Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра автоматизированного электропривода,
электромеханики и электротехники

А.С. Падеев, Д.В. Сурков, И.И. Ямансарин

РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЭКРАНИРОВАННЫМИ ПОЛЮСАМИ

Рекомендовано к изданию ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Оренбург
2017

УДК 621.313.333(075.8)
ББК 31.261.63я73
П 12

Рецензент – доцент, кандидат технических наук С.В. Митрофанов

Падеев, А.С.

П 12 Расчет асинхронного двигателя с экранированными полюсами: учебное пособие/ А.С. Падеев, Д.В. Сурков, И.И. Ямансарин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 100 с.

Учебное пособие предназначено для выполнения курсового проекта по курсу "Электрические машины систем автоматики" студентами по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения.

УДК 621.313.333(075.8)
ББК 31.261.63я73



Содержание

Введение

Современное развитие промышленности, транспорта, сельского хозяйства и новых отраслей техники – авиации, радиолокации, телевидения и специальных видов техники – вызвало широкое применение автоматизации управления различными рабочими процессами и исполнительными механизмами. Эта автоматизация немыслима без широкого применения различных маломощных электродвигателей постоянного и переменного тока в диапазоне мощностей от нескольких единиц до сотен ватт как в качестве управляющих, так и исполнительных элементов в схемах автоматики. Вместе с этим электрические машины малой мощности широко используют не только в автоматических устройствах, но также и для других разнообразных целей как в промышленности, так и в быту [1, 2].

Электрические машины малой мощности применяют на практике главным образом в качестве электродвигателей. Однако встречается ряд специальных установок, в которых наряду с электродвигателями имеют применение также и маломощные генераторы, преобразователи и электромашинные усилители.

В области малых мощностей существует большое разнообразие конструкций различных типов электродвигателей. В некоторых из этих конструкций наблюдается органическое соединение двигателей с приборами и механизмами, в которых двигатель часто лишается своих индивидуальных форм и превращается просто в «оживляющий» орган механизма.

В настоящее время электродвигатели и генераторы малой мощности занимают важное место в современной технике, так как практически ни одна отрасль техники, использующая в той или иной мере принципы электротехники, почти не обходится без применения электродвигателей малых мощностей в качестве привода или исполнительного элемента. Ввиду этого практическое значение электрических машин малой мощности весьма велико и к ним требуется

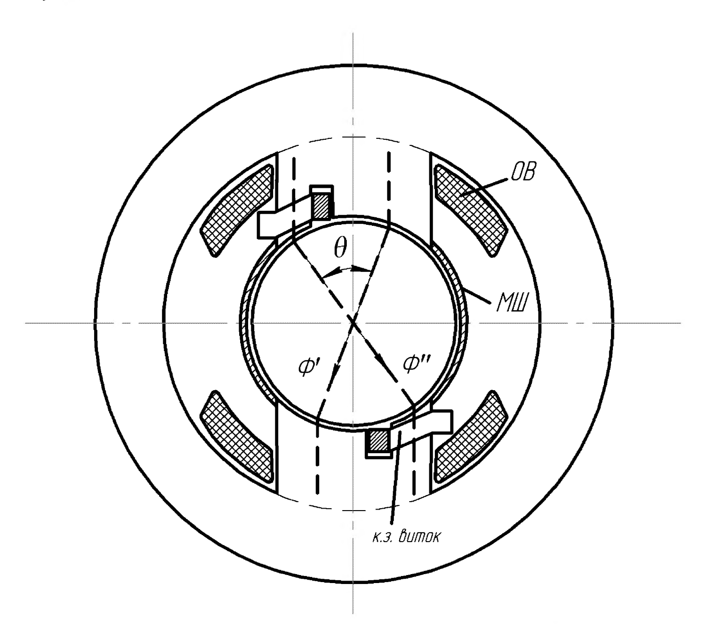
надлежащее внимание. Производство этих машин представляет собой своеобразную и специальную отрасль электромашиностроения с их серийным и массовым выпуском.

Большое количество бытовых приборов имеют нагрузку вентиляторного типа. Для таких приборов применяются все типы асинхронных двигателей, выпуск которых в общем объеме производства двигателей для бытовых приборов составляет около 70 %. Большинство асинхронных двигателей, применяемых в быту, выполняются однофазными малой мощности. Эти двигатели при наличии только одной обмотки на статоре создают пульсирующий магнитный поток, и не обладают начальным или пусковым моментом. Для создания пускового момента двигатели выполняются либо с неявнополюсным статором и дополнительной пусковой обмоткой, уложенной в пазы статора, либо статор выполняется явнополюсным с сосредоточенной обмоткой. Магнитная система этих двигателей выполняется двух и четырехполюсной, в зависимости от требуемой скорости вращения. В каждом полюсе один из наконечников охватывается вспомогательной обмоткой, состоящей из одного или нескольких короткозамкнутых витков, которые экранируют от 1/5 до 1/2 полюсной дуги. Ротор двигателя – короткозамкнутый обычного типа.

1 Общие сведения. Задание на проектирование

Асинхронный двигатель с экранированными полюсами (с короткозамкнутым витком) является широко распространенным двигателем в приводах, где не требуется большого пускового момента ($M_п/M_{ном}$=0,2 – 0,4), например, в магнитофонах, проигрывателях, вентиляторах и т.д. (Приложение В).

Конструкция двигателя показана на рисунке 1.1 [3]. Статор, собираемый из тонких листов электротехнической стали, имеет явновыраженные полюса (*2p*=2 или 4). Часть каждого полюса охватывается короткозамкнутым витком, выполняемым из толстой медной или алюминиевой шины. На полюсах располагается сосредоточенная однофазная обмотка возбуждения. Ротор всегда короткозамкнутый.



ОВ – обмотка возбуждения; *МШ* – магнитный шунт

Рисунок 1.1 – Поперечный разрез асинхронного двигателя с экранированными полюсами

Принцип действия. При питании обмотки возбуждения переменным током возникает пульсирующий магнитный поток $\dot{\Phi}_B$ (рисунок 1.2,а), часть которого $\dot{\Phi}$\` проходит по неэкранированной части полюса; другая – $\dot{\Phi}$\`\` проходит по экранированной части полюса, сцепляется с витком и наводит в нем ЭДС $\dot{E}_{КЗВ}$. Под действием ЭДС $\dot{E}_{КЗВ}$ по витку протекает ток $\dot{I}_{КЗВ}$ и возникает поток витка $\dot{\Phi}_{КЗВ}$, который совместно с потоком $\dot{\Phi}$\`\` образует поток экранированной части $\dot{\Phi}_{ЭК}$. ЭДС $\dot{E}_{КЗВ}$ отстает от потока экранированной части $\dot{\Phi}_{ЭК}$ на угол 90 градусов (рисунок 1.2,б). Из диаграммы видно, что поток экранированной $\dot{\Phi}_{ЭК}$ и поток неэкранированной части $\dot{\Phi}$\` сдвинуты во времени на угол β. К тому же потоки $\dot{\Phi}_{ЭК}$ и $\dot{\Phi}$\` сдвинуты в пространстве на угол θ (рисунок 1.1). Таким образом, в двигателе имеются два потока, сдвинутых в пространстве и во времени. Этого достаточно, чтобы даже при сосредоточенной однофазной обмотке в двигателе образовалось вращающееся магнитное поле. Поскольку углы β и θ далеко не 90°, это поле эллиптическое.

Вращающееся поле статора индуцирует в короткозамкнутой обмотке ротора ЭДС и токи, которые, взаимодействуя с ним, создают вращающий момент.

Ток витка:

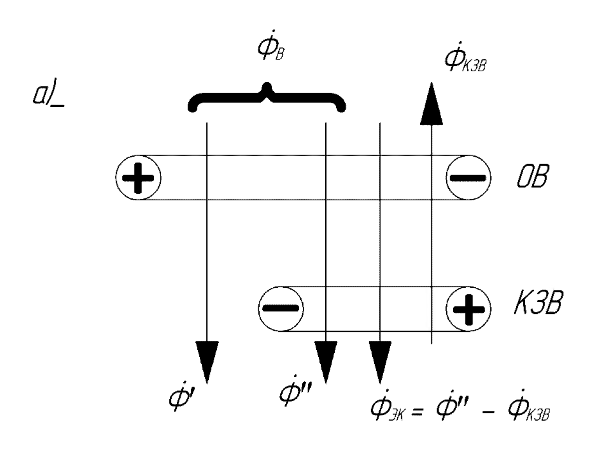
$$I_K = \dot{E}_{КЗВ} / \underline{Z}_{КЗВ} \equiv W_K / \left(W_K^2 \lambda_K\right),$$

где W_K – число витков короткозамкнутой обмотки статора;

$Z_{КЗВ}$ – полное сопротивление витка;

λ_K – коэффициент магнитной проводимости пути потока пазового рассеяния витка.

Поскольку активное сопротивление витка очень маленькое, $Z_K \approx X_K$.



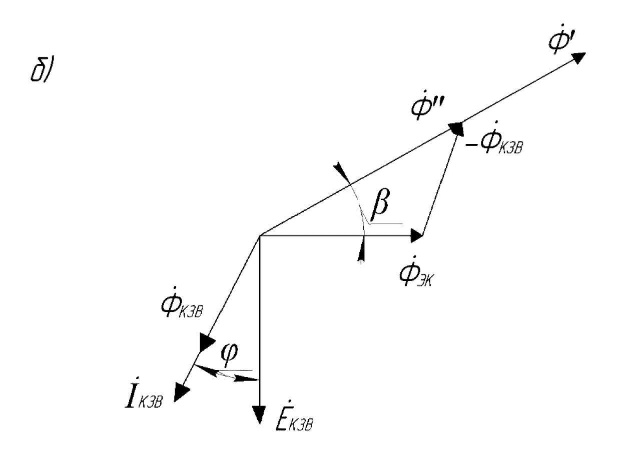


Рисунок 1.2 – Асинхронный двигатель с экранированными полюсами: а) – схема потоков; б) – векторная диаграмма

В свою очередь:

$$X_K \equiv W_K^2 \lambda_K .$$

Тангенс угла между током витка и его ЭДС:

$$\tan\varphi = X_K / R_K \equiv W_K^2 \lambda_K / W_K \equiv W_K \lambda_K .$$

Из векторной диаграммы, следует, что для усиления "сдвигающего" эффекта витка ток витка $\dot{I}_{КЗВ}$ (поток $\dot{\Phi}_{КЗВ}$) должен быть по возможности большим, а угол φ - по возможности меньшим. Для того чтобы выполнить оба эти требования, виток должен быть действительно одним, а укладывать его надо в открытый паз, как имеющий наименьший коэффициент магнитной проводимости рассеяния.

Сосредоточенная обмотка возбуждения создает прямоугольную волну НС, в которой сильно выражена 3-я гармоника (рисунок 1.3,а). Эта гармоника образует свой вращающий момент, из-за чего в пусковой характеристике двигателя возникает глубокий провал (рисунок 1.3,б). По этой причине вполне вероятно застревание ротора при скорости вращения примерно равной 1/3 синхронной.

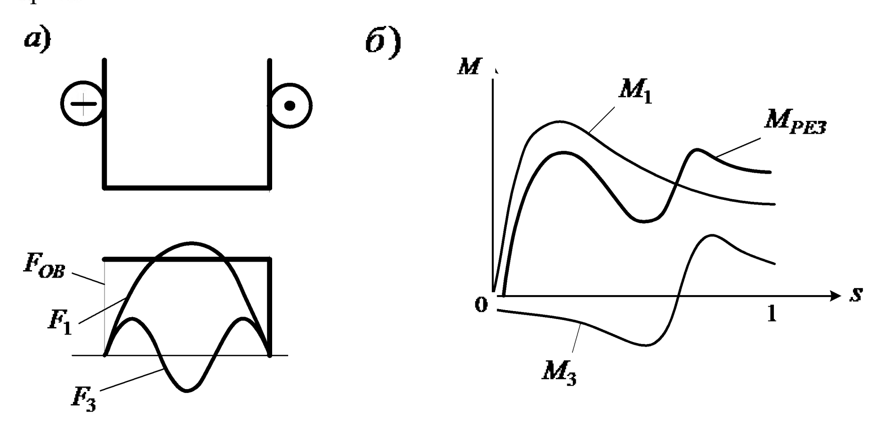


Рисунок 1.3 – Намагничивающая сила сосредоточенной обмотки возбуждения и ее гармонические составляющие (а); механическая характеристика двигателя (б)

Короткозамкнутый виток приводит к большим потерям мощности, поэтому КПД двигателя составляет всего 25 – 40 %. Его cosφ=0,4 – 0,6. Большие потоки рассеяния обмотки ротора, которые замыкаются через полюсные наконечники, приводят к большим индуктивным сопротивлениям этой обмотки, поэтому кратность пускового тока двигателя весьма небольшая ($I_п/I_{ном}$=1,2 – 1,5).

Следствием всего вышесказанного является высокая надежность двигателя с экранированными полюсами. Главный недостаток двигателя заключается в его нереверсивности. Ротор всегда вращается в сторону короткозамкнутого витка.

Существуют разновидности двигателей с несколькими витками, вообще без витков, но с неравномерным воздушным зазором (рисунок 1.4). Однако, несмотря на все усовершенствования, пусковые и рабочие свойства двигателей остаются невысокими.

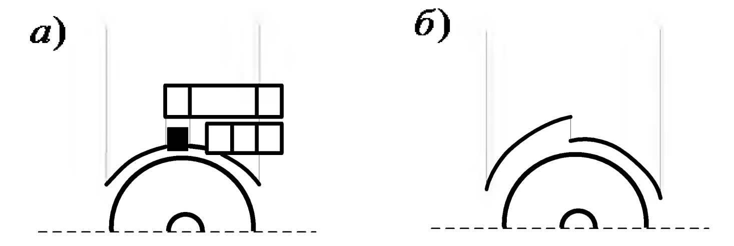


Рисунок 1.4 – Асинхронные двигатели с несколькими витками (а) и с неравномерным воздушным зазором (б)

Задание на проектирование двигателя.

Спроектировать асинхронный однофазный двигатель с расщепленными или экранированными полюсами статора и короткозамкнутым ротором. Исходные данные расчета:

- полезная мощность – P_2, *Вт*;

- число полюсов статора – $2p$;

- напряжение питающей сети – U_1, *В*;

- частота питающей сети – f_1, *Гц*;

- режим работы двигателя – продолжительный;

- нагрузка двигателя – вентилятор;

- исполнение двигателя – открытое или защищенное.

В Приложении В приведены основные технические требования к приводу бытовых приборов с вентиляторной нагрузкой.

2 Основные размеры однофазного асинхронного электродвигателя с явнополюсным статором

Основные размеры однофазного асинхронного двигателя с явнополюсным статором: диаметр расточки и длину его пакета можно определить с помощью машинной постоянной, пользуясь средней линейной нагрузкой явнополюсного статора [5].

Под средней линейной нагрузкой явнополюсного статора асинхронного двигателя здесь понимается следующая величина, $A/м$:

$$A = \frac{4pW_1I_1}{\pi\ D_a}, \qquad (2.1)$$

где I_1 – потребляемый двигателем ток из сети, *А*;

D_a – диаметр расточки пакета статора, *м*;

W_1 – число витков обмотки статора, приходящихся на полюс;

Расчетная мощность однофазного асинхронного двигателя с явнополюсным статором может быть выражена через потребляемую им мощность из сети, *кВт*:

$$P_a = \zeta \frac{P_2 \cdot 10^{-3}}{\eta \cos \varphi_1}, \qquad (2.2)$$

где $\eta \cos \varphi_1$ – произведение КПД и коэффициента мощности, выбираемое предварительно по кривым рисунков 2.1-2.2 в зависимости от мощности на валу.

ζ – отношение ЭДС обмотки статора к напряжению питающей сети:

$$\zeta = \frac{E_1}{U_1} = 0{,}80 - 0{,}94 . \qquad (2.3)$$

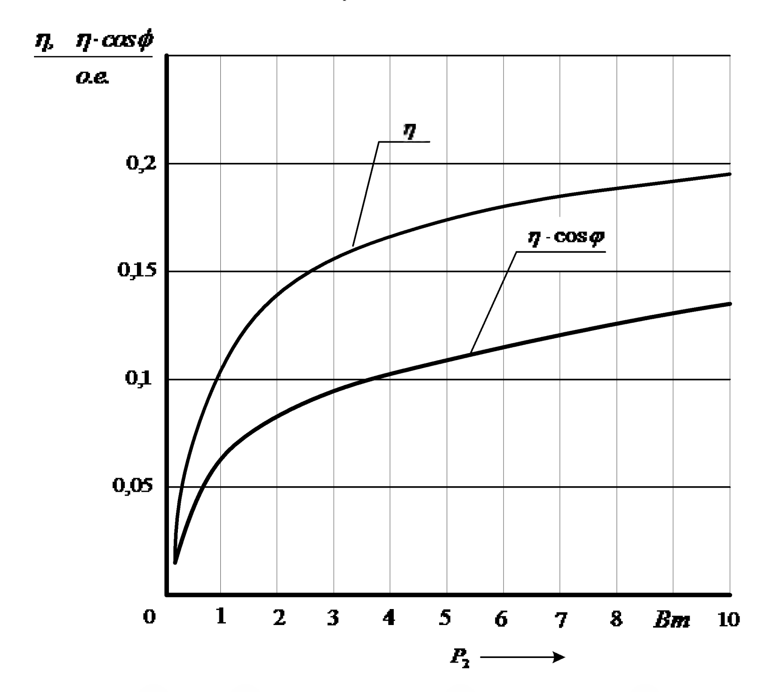


Рисунок 2.1 – Зависимости КПД и произведения его на коэффициент мощности в зависимости от полезной мощности на валу в диапазоне мощностей от 0 до 10 *Вт*

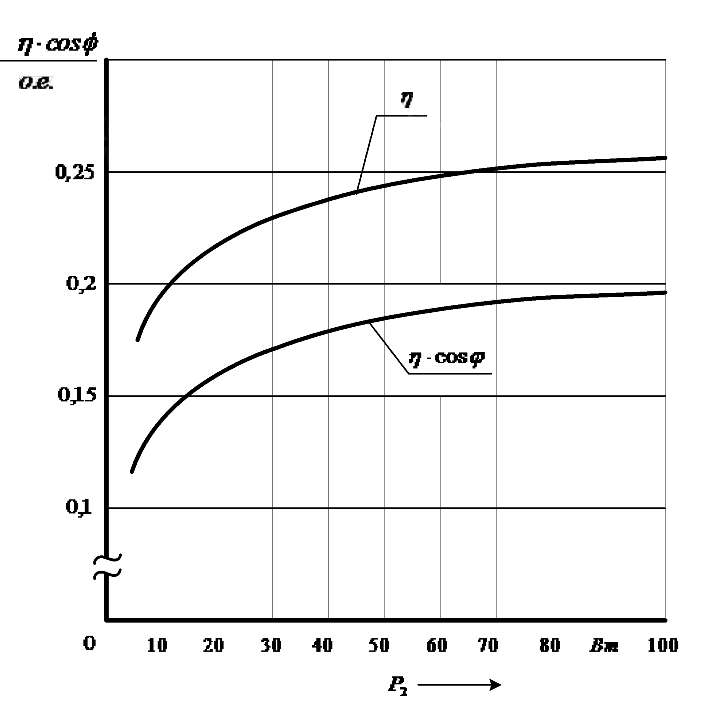


Рисунок 2.2 – Зависимости КПД и произведения его на коэффициент мощности в зависимости от полезной мощности на валу в диапазоне мощностей от 10 до 100 *Вт*

Машинная постоянная

$$C = \frac{5{,}5 \cdot 10^3}{\alpha\ B_\delta A} = \frac{D_a^2\ l_o\ n_1}{P_a}, \tag{2.4}$$

где l_o – длина пакета статора, *м*;

$\alpha = 0{,}6 - 0{,}9$ – коэффициент полюсного перекрытия;

B_δ – амплитуда индукции в воздушном зазоре, *Тл*;

A – средняя линейная нагрузка статора, *А/м*;

n_1 – синхронная скорость вращения, *об/мин*:

$$n_1 = \frac{60f}{p}. \tag{2.5}$$

Индукция B_δ и средняя линейная нагрузка A однофазных асинхронных двигателей малой мощности с экранированными полюсами выбираются по кривым рисунков 2.3-2.4 в зависимости от отношения полезной мощности к синхронной скорости вращения двигателя.

В однофазных асинхронных двигателях с экранированными полюсами отношение расчетной длины l_o пакета статора к диаметру его расточки D_a находится в следующих пределах:

$$\xi = \frac{l_o}{D_a} = 0{,}4 - 1{,}2. \tag{2.6}$$

Диаметр расточки пакета статора, *м*:

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{C\,P_a}{\xi\, n_1}}. \tag{2.7}$$

Длина пакета статора, *м*:

$$l_o = \xi \cdot D_a. \tag{2.8}$$

Расчетное значение диаметра расточки статора округляют с точностью до целых миллиметров, а значение длины пакета статора округляют с точностью до 0,5 миллиметра.

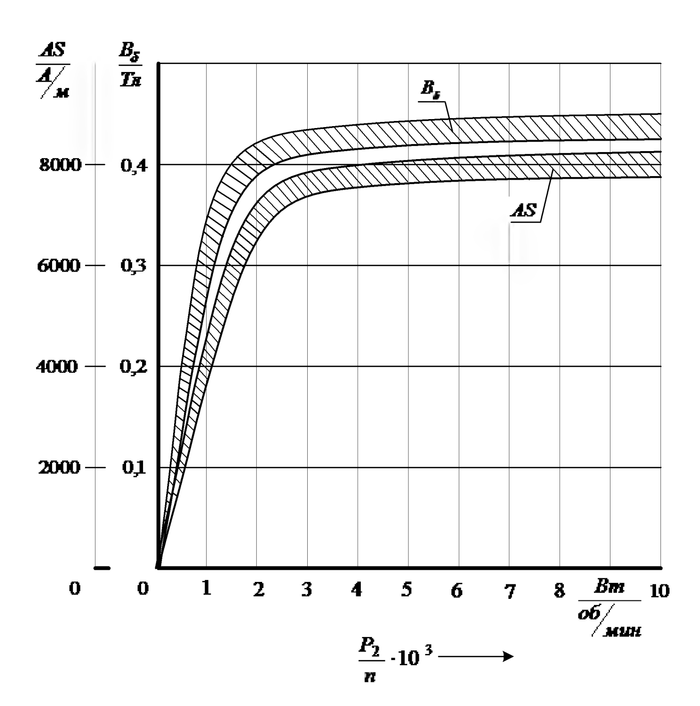


Рисунок 2.3 – Зависимости индукции в воздушном зазоре и средней линейной нагрузки статора от отношения полезной мощности к синхронной скорости вращения

Полюсный шаг, *м*:

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}. \qquad (2.9)$$

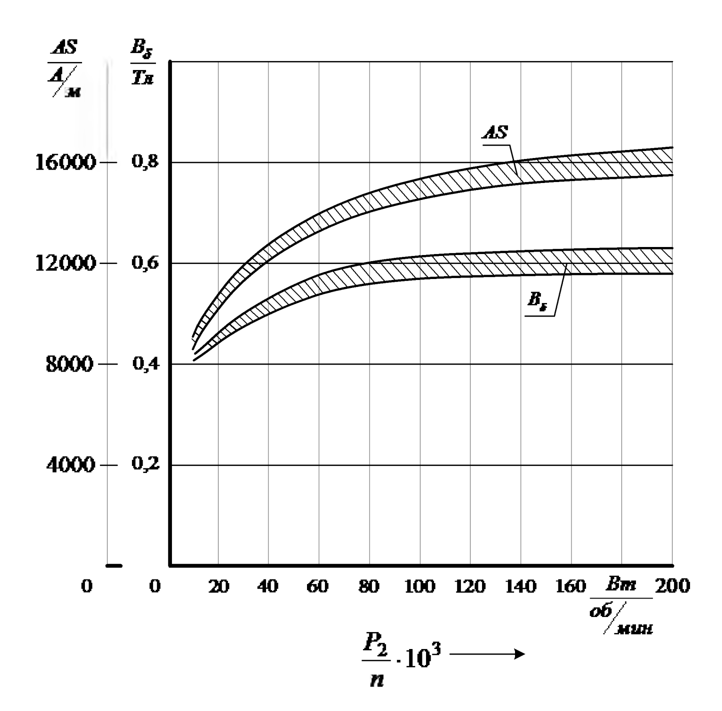


Рисунок 2.4 – Зависимости индукции в воздушном зазоре и средней линейной нагрузки статора от отношения полезной мощности к синхронной скорости вращения

Расчетная полюсная дуга, *м*:

$$b_o = \alpha\tau\,. \tag{2.10}$$

3 Главная обмотка статора

На явновыраженных полюсах статора однофазного асинхронного двигателя размещаются две обмотки – главная сосредоточенная обмотка в виде катушек вокруг сердечников полюсов и пусковая обмотка в виде короткозамкнутых витков, охватывающих части полюсных наконечников.

Главная обмотка полюсов является обмоткой возбуждения двигателя, создающей основной магнитный поток. Эта обмотка выполняется из круглого медного провода, и рассчитывается следующим образом:

Номинальный ток главной обмотки статора, *А*:

$$I_1 = \frac{P_2}{U_1\,\eta\cos\varphi_1}. \tag{3.1}$$

Амплитуда полезного магнитного потока двигателя, *Вб*:

$$\Phi = B_\delta\, b_o\, l_o. \tag{3.2}$$

ЭДС главной обмотки статора, *В*:

$$E_1 = \zeta \cdot U_1. \tag{3.3}$$

Число витков главной обмотки статора, приходящихся на полюс:

$$W_1 = \frac{E_1}{2p \cdot 4{,}44 f_1 \Phi}. \tag{3.4}$$

Полученное число витков необходимо округлить до ближайшего целого значения.

Ориентировочное сечение провода главной обмотки статора, *мм*^{2}:

$$q_{a1}^{`} = \frac{I_1}{j_1^{`}}, \qquad (3.5)$$

где $j_1^{`} = 3 - 5$ – плотность тока в главной обмотке статора, *А/мм*^{2}.

Марка обмоточного провода определяется классом нагревостойкости изоляции (температурным индексом). В асинхронных двигателях с экранированными полюсами возможно применение медного круглого провода марки ПЭТВ класса нагревостойкости В, покрытого высокопрочной эмалью на полиэфирной основе, или медного круглого провода марки ПЭТ класса нагревостойкости F, покрытого высокопрочной эмалью на полиэфироимидной основе.

Диаметр неизолированного провода d, диаметр изолированного провода $d_{из}$, а также сечение элементарного проводника $q_{эл}$ выбирают по стандарту, приложение А таблица А1. Диаметр изолированного проводника не должен превышать 2,6 мм. Если требуемое сечение проводника q_{a1} больше, чем у обмоточного провода предельного допустимого диаметра, то эффективный проводник подразделяют на элементарные. Это означает, что обмотка выполняется из нескольких параллельных проводников.

Сечение провода главной обмотки статора, *мм*^{2}:

$$q_{a1} = q_{эл} n_{эл}. \qquad (3.6)$$

Полученная плотность тока в главной обмотке статора, *А/мм*^{2}:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_{a1}}. \qquad (3.7)$$

После выбора обмоточного провода необходимо выполнить размещение главной обмотки статора на полюсе.

Длина полюса статора:

$$l_{пл} = l_o . \tag{3.8}$$

Высота сердечника полюса, *м*:

$$h_{пл} = (0{,}25 - 0{,}4) D_a . \tag{3.9}$$

Поперечное сечение сердечника полюса, *м*^{2}:

$$S_{пл} = \frac{\Phi \cdot \sigma}{B_{пл} k_c} , \tag{3.10}$$

где $\sigma = 1{,}16 - 1{,}24$ – коэффициент магнитного рассеяния главной обмотки статора;

$B_{пл} \le 0{,}8 - 1{,}0$ – индукция в сердечнике полюса, *Тл*;

$k_c = 0{,}96 - 0{,}97$ – коэффициент заполнения пакета сталью.

Ширина сердечника полюса, *м*:

$$b_{пл} = \frac{S_{пл}}{l_{пл}} . \tag{3.11}$$

Требуемая площадь окна для размещения главной обмотки на полюсе, *м*^{2}:

$$S_{a1} = \frac{W_1 n_{эл} d_{из}^2 10^{-6}}{f_o^`} , \tag{3.12}$$

где $f_o^` = 0,8 - 0,84$ – коэффициент, учитывающий возможные неточности намотки рядов обмоточного провода в катушке.

После этого определяются высота и ширина катушки с учетом выбранной высоты $h_{пл}$ полюса.

Высота катушки, *м*:

$$h_k = (0,4 - 0,6)h_{пл}. \tag{3.13}$$

Ширина катушки, *м*:

$$b_k = \frac{S_{a1}}{h_k}. \tag{3.14}$$

Высота сердечника пакета статора, *м*:

$$h_c = \frac{\Phi \cdot \sigma}{2 \cdot l_o \ B_c \ k_c}, \tag{3.15}$$

где $B_c \leq 0,8 - 1,0$ – индукция в сердечнике статора, *Тл*.

Наружный диаметр пакета статора, *м*:

$$D_н = D_a + 2(h_{пл} + h_c). \tag{3.16}$$

4 Выбор воздушного зазора

Правильный выбор воздушного зазора δ во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя [3]. Чем меньше величина воздушного зазора, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть суммарного магнитного напряжения всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответствующему уменьшению магнитного напряжения магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, благодаря чему возрастает коэффициент мощности двигателя и уменьшаются потери в главной обмотке статора. Но чрезмерное уменьшение величины воздушного зазора приводит к возрастанию амплитуд зубцовых пульсаций индукции в зазоре и, как следствие этого, к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Также при малых величинах воздушного зазора значительно увеличивается сила одностороннего магнитного притяжения, действующая на ротор и способная привести к “залипанию” ротора.

В однофазных асинхронных двигателях с экранированными полюсами воздушный зазор между внутренней поверхностью статора и ротором обычно находится в пределах: $\delta = 0{,}2 - 0{,}4$ *мм*. При этом величина зазора должна быть кратна значению 0,05. Например, зазор выбирают равным 0,2; 0,25; 0,3 *мм* и т.д.

5 Расчет короткозамкнутого ротора

Диаметр ротора асинхронного двигателя, *м*:

$$D_p = D_a - 2\delta . \qquad (5.1)$$

Короткозамкнутые обмотки ротора типа «беличья клетка» не имеют определенного числа фаз и числа полюсов. По этой причине один и тот же ротор

может работать в асинхронных двигателях, статоры которых выполнены с разным числом полюсов. Принято считать, что число фаз ротора с короткозамкнутой обмоткой $m_2 = z_2$, то есть, каждый стержень обмотки образует одну фазу. Число витков в каждой фазе $W_2 = \frac{1}{2}$, а виток образован одним стержнем и прилегающими к нему с двух сторон двумя элементами замыкающих колец. Обмоточный коэффициент короткозамкнутой обмотки $k_{w2} = 1$.

При расчете ротора с беличьей клеткой большое значение имеет правильный выбор числа пазов ротора z_2. Это объясняется тем, что в магнитном поле в воздушном зазоре кроме основной гармонической присутствует целый спектр гармонических высшего порядка. Гармонические высшего порядка индуцируют в короткозамкнутой обмотке ротора ЭДС и являются причиной появления в обмотке ротора токов высших гармоник. В результате взаимодействия токов и полей высших гармонических возникают дополнительные синхронные и асинхронные моменты. Возникновение дополнительных электромагнитных моментов проявляется в появлении провалов и пиков в результирующей кривой момента.

Таким образом, от того насколько правильно выбрано число пазов ротора зависят пусковые свойства асинхронного двигателя, виброакустические показатели, степень проявления синхронных и асинхронных моментов, вызванных высшими гармоническими.

Для снижения влияния синхронных моментов от высших гармонических при пуске двигателя требуется выполнить неравенство:

$$z_2 \neq 2pm_1g. \tag{5.2}$$

где m_1 – число фаз статора;

$g = 1, 2, 3\ldots$ – числа целого ряда.

Во избежание тормозящих синхронных моментов от высших гармонических при вращении ротора необходимо выполнить неравенство:

$$z_2 \neq 2pm_1 g \pm 2p\,. \tag{5.3}$$

Для устранения одностороннего притяжения ротора к расточке статора и радиальных вибрационных сил необходимо удовлетворить неравенствам:

$$z_2 \neq 2pm_1 g \pm 1\,. \tag{5.4}$$

$$z_2 \neq 2pm_1 g \pm 2p \pm 1\,. \tag{5.5}$$

Как показывают исследования, в целях уменьшения магнитного шума в малых асинхронных двигателях число пазов ротора z_2 выбирают четным. Для большего же уменьшения влияния вредных асинхронных и синхронных моментов на свойства этих двигателей целесообразно применять в них скос пазов на одно пазовое деление или более. Таким образом, для проектируемого двигателя можно принять: $z_2 = 8; 10; 12; 14; 16; 18$.

Зубцовое деление ротора, *м*:

$$t_2 = \frac{\pi D_p}{z_2}\,. \tag{5.6}$$

В асинхронных микродвигателях сердечник ротора непосредственно насаживают на вал. При таком исполнении внутренний диаметр магнитопровода ротора равен диаметру вала, *м*:

$$d_{вл} = (0{,}18 - 0{,}24)D_p\,. \tag{5.7}$$

Ток стержня короткозамкнутого ротора с беличьей клеткой, *А*:

$$I_{cm} = k\frac{2m_1k_{w1}W_1}{z_2}I_1, \tag{5.8}$$

где $k = 0{,}2 - 0{,}5$ – отношение магнитодвижущих сил обмоток ротора и статора в асинхронных двигателях мощностью менее 600 Вт;

$k_{w1} = 1$ – обмоточный коэффициент главной обмотки статора.

Ток короткозамыкающего кольца ротора, *А*:

$$I_{kл} = k\frac{m_1k_{w1}W_1}{z_2\sin\left(\frac{\pi\ p}{z_2}\right)}I_1. \tag{5.9}$$

Предварительное значение площади поперечного сечения стержня ротора, *мм²*:

$$q'_{cm} = \frac{I_{cm}}{J_{cm}}, \tag{5.10}$$

где $J_{cm} \le 10 - 12\ \frac{A}{мм^2}$ – плотность тока в стержне ротора.

Диаметр стержня ротора, *мм²*:

$$d_{cm} = \sqrt{\frac{4\,q'_{cm}}{\pi}}. \tag{5.11}$$

Полученное значение диаметра стержня необходимо округлить с точностью 0,1 мм.

Уточняем площадь поперечного сечения стержня, *мм*^{2}:

$$q_{cm} = \frac{\pi\, d_{cm}^2}{4}. \qquad (5.12)$$

Уточняем плотность тока в стержне ротора, *А/мм*^{2}:

$$J_{cm} = \frac{I_{cm}}{q_{cm}}. \qquad (5.13)$$

Предварительное значение площади поперечного сечения кольца ротора, *мм*^{2}:

$$q_{кл}^{`} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}}, \qquad (5.14)$$

где $J_{кл} \le 12 - 15\ \frac{A}{мм^2}$ – плотность тока в кольце ротора.

Высота кольца ротора, *мм*:

$$b_{кл} = (1{,}2 - 1{,}25) d_{cm}. \qquad (5.15)$$

Толщина кольца ротора, *мм*:

$$a_{кл} = \frac{q_{кл}^{`}}{b_{кл}}. \qquad (5.16)$$

Полученные значения $a_{кл}$ и $b_{кл}$ необходимо округлить с точностью 0,1 мм.

Уточняем площадь поперечного сечения кольца, *мм²*:

$$q_{кл} = a_{кл} b_{кл}. \quad (5.17)$$

Уточняем плотность тока в короткозамыкающем кольце, *А/мм²*:

$$J_{кл} = \frac{I_{кл}}{q_{кл}}. \quad (5.18)$$

Средний диаметр короткозамыкающих колец, *м*:

$$D_{кл} = D_p - b_{кл} \cdot 10^{-3}. \quad (5.19)$$

В асинхронных микродвигателях пазы ротора выполняются полузакрытыми (рисунок 5.1). Размеры шлицевой части паза: $b_{ш2} = 1$ мм, $h_{ш2} = 0{,}5$ мм.

При выполнении короткозамкнутой обмотки ротора заливкой из алюминия, диаметр паза ротора $d_{п2} = d_{ст}$. Если обмотка ротора выполняется из другого материала $d_{п2} = d_{ст} + 0{,}2$.

Полная высота паза ротора, *мм*:

$$h_{п2} = d_{п2} + h_{ш2}. \quad (5.20)$$

Ширина зубца ротора, *м*:

$$b_{з2} = \pi \frac{D_p - (2h_{ш2} + d_{п2}) \cdot 10^{-3}}{z_2} - d_{п2} \cdot 10^{-3}. \quad (5.21)$$

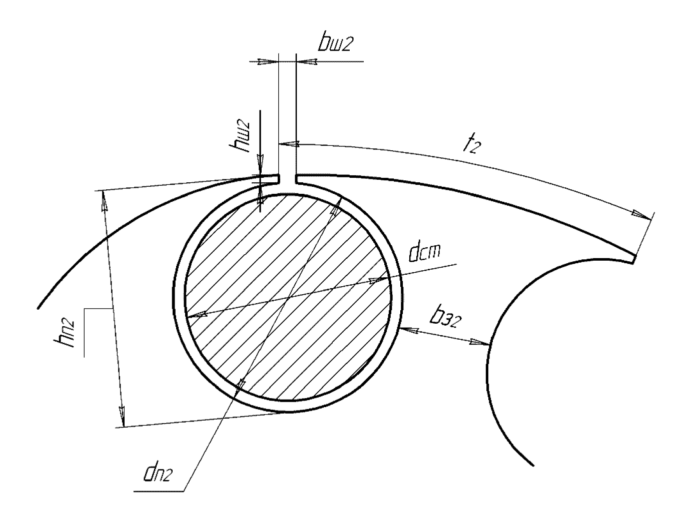


Рисунок 5.1 – Паз ротора

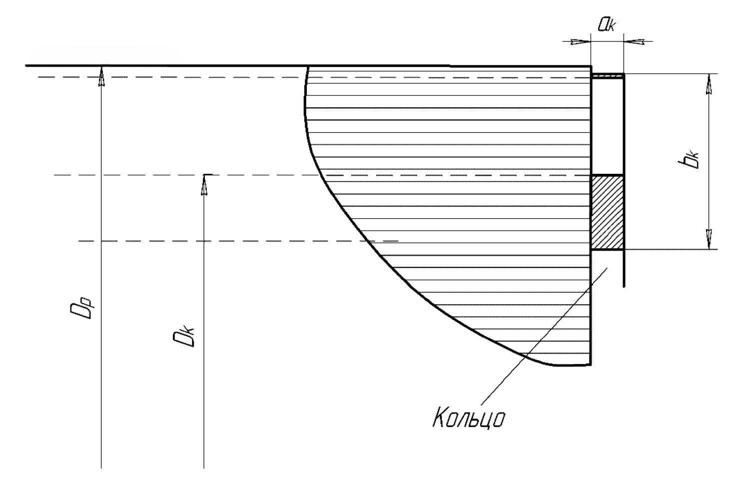


Рисунок 5.2 – Беличья клетка ротора

6 Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи проводят с целью определения суммарной намагничивающей силы, необходимой для создания рабочего магнитного потока в воздушном зазоре.

Магнитное напряжение воздушного зазора равно, *А*:

$$F_\delta = 1{,}59 B_\delta k_\delta \delta \cdot 10^6, \qquad (6.1)$$

где k_δ – коэффициент воздушного зазора. Учитывает возрастание магнитного сопротивления воздушного зазора, вызванное зубчатым строением поверхности ротора.

Коэффициент воздушного зазора:

$$k_\delta = \frac{t_2 + 10\delta}{t_2 - b_{ш2} + 10\delta}. \qquad (6.2)$$

Индукция в сердечнике полюса, *Тл*:

$$B_{пл} = \frac{\Phi\ \sigma}{l_{пл}\ b_{пл}\ k_c}. \qquad (6.3)$$

Магнитное напряжение сердечников полюсов статора, *А*:

$$F_{пл} = 2 H_{пл} h_{пл}, \qquad (6.4)$$

где $H_{пл}$ – напряженность магнитного поля в полюсе статора. Определяется по значению магнитной индукции в сердечнике полюса по кривым намагничивания зубцов, приложение Б.

Индукция в сердечнике статора, *Тл*:

$$B_c = \frac{\Phi\ \sigma}{2 \cdot l_o\ h_c\ k_c}. \tag{6.5}$$

Средняя длина магнитного потока в сердечнике, *м*:

$$L_c = \frac{\pi\left(D_н - h_c\right)}{2p}. \tag{6.6}$$

Магнитное напряжение сердечника статора, *А*:

$$F_c = H_c L_c, \tag{6.7}$$

где H_c – напряженность магнитного поля в сердечнике статора. Определяется по значению магнитной индукции в сердечнике статора по кривым намагничивания ярма, приложение Б.

Индукция в узком сечении зубца ротора при круглом пазе, *Тл*:

$$B_{з.р} = \frac{B_\delta\ t_2}{b_{з2}\ k_c}. \tag{6.8}$$

Магнитное напряжение зубцов ротора, *А*:

$$F_{з.р} = 2H_{з.р} h_{п2} 10^{-3}, \tag{6.9}$$

где $H_{з.р}$ – напряженность магнитного поля в зубцах ротора. Определяется по значению магнитной индукции в зубце ротора по кривым намагничивания зубцов, приложение Б.

Индукция в сердечнике ротора, *Тл*:

$$B_p = \frac{\Phi}{2 \cdot l_o\ h_p\ k_c}, \qquad (6.10)$$

где h_p – высота сердечника ротора, *м*:

$$h_p = \frac{D_p - 2h_{n2} \cdot 10^{-3} - d_{вл}}{2}. \qquad (6.11)$$

Средняя длина пути магнитного потока в роторе, *м*:

$$L_p = \frac{\pi\left(D_p - 2h_{n2} \cdot 10^{-3} - h_p\right)}{2p}. \qquad (6.12)$$

Магнитное напряжение сердечника ротора, *А*:

$$F_p = H_p L_p, \qquad (6.13)$$

где H_p – напряженность магнитного поля в сердечнике ротора. Определяется по значению магнитной индукции в сердечнике ротора по кривым намагничивания ярма, приложение Б.

Суммарное магнитное напряжние обмотки статора, приходящаяся на пару полюсов, *А*:

$$F_\Sigma = F_\delta + F_{пл} + F_c + F_{з.р} + F_p. \qquad (6.14)$$

Коэффициент насыщения магнитной системы двигателя:

$$k_н = \frac{F_\Sigma}{F_\delta}. \qquad (6.15)$$

Намагничивающий ток, *А*:

$$I_{or} = \frac{p\,F_\Sigma}{1{,}8 \cdot 2\,p\,W_1}. \qquad (6.16)$$

7 Параметры асинхронного двигателя для номинального режима

Параметрами асинхронного двигателя с расщепленными полюсами называют активное и индуктивное сопротивления: главной обмотки статора r_1, x_1; короткозамкнутого витка статора $r_з, x_з$; короткозамкнутой обмотки ротора r_2, x_2; индуктивное сопротивление намагничивающего контура x_o и индуктивное сопротивление взаимной индуктивности между главной обмоткой и короткозамкнутым витком статора.

7.1 Расчет активного и индуктивного сопротивлений главной обмотки статора

Средняя длина витка главной обмотки статора, *м*:

$$l_{ср1} \approx 2\left(\frac{b_o + b_{пл}}{2} + l_{пл} + 2b_k\right). \qquad (7.1)$$

Активное сопротивление главной обмотки статора в нагретом состоянии при температуре $75\,^{o}C$, *Ом*:

$$r_1 = k_\theta \frac{2p\,W_1\,l_{cp1}}{\gamma\,q_{a1}\cdot 10^{-6}}. \tag{7.2}$$

где γ – удельная электрическая проводимость материала обмотки статора, стержней и колец, имеющая следующие значения при $t = 20\,^{o}C$: для меди $\gamma = 57\cdot 10^6\,\frac{м}{Ом\cdot м^2}$; для латуни $\gamma = 14\cdot 10^6\,\frac{м}{Ом\cdot м^2}$; для никелина $\gamma = 2{,}4\cdot 10^6\,\frac{м}{Ом\cdot м^2}$; для алюминия $\gamma = 26\cdot 10^6\,\frac{м}{Ом\cdot м^2}$;

k_θ – коэффициент увеличения сопротивления обмотки статора, стержня или кольца ротора при нагревании их от 20 ^{o}C до $\vartheta\,^{o}C$:

$$k_\theta = 1 + \alpha_t(\vartheta - 20), \tag{7.3}$$

где α_t – температурный коэффициент: для меди $\alpha_t = 0{,}004$; для латуни $\alpha_t = 0{,}002$; для никелина $\alpha_t = 0{,}00002$; для алюминия $\alpha_t = 0{,}004$.

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура, приведенное к числу витков главной обмотки статора, *Ом*:

$$x_o = 7{,}8\,\alpha\;p\;f_1\,W_1^2\,\frac{\tau\,l_o\cdot 10^{-6}}{k_н k_\delta \delta}. \tag{7.4}$$

Индуктивное сопротивление главной обмотки статора, *Ом*:

$$x_1 = 2\,\gamma_s(\sigma - 1)\,x_o, \tag{7.5}$$

где $\gamma_s = 0{,}75 - 0{,}85$ – коэффициент сцепления потока рассеяния с главной обмоткой статора.

Полное сопротивление главной обмотки статора, *Ом*:

$$\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1, \tag{7.6}$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

7.2 Расчет размеров и параметров пускового короткозамкнутого витка

Как показывает анализ явлений в однофазном асинхронном двигателе с экранированными полюсами, для получения наибольшего значения пускового момента этого двигателя полюсная дуга экранируемой части полюса $\alpha_{i\,k}$ должна составлять около $1/3$ или несколько менее всей дуги полюсного наконечника (рисунок 7.1).

Электрический угол полюсной дуги одного полюса:

$$\alpha_i = \frac{360\,p}{2} \cdot \frac{b_o}{\tau}. \tag{7.7}$$

Электрический угол полюсной дуги экранируемой части полюса:

$$\alpha_{i\,k} \le k_{экр} \alpha_i, \tag{7.8}$$

где $k_{экр} \le 1/3$.

Полюсная дуга экранируемой части полюса, *м*:

$$b_{пл}^{`} = (0,8 - 0,9) \cdot k_{экр} b_{пл}. \quad (7.9)$$

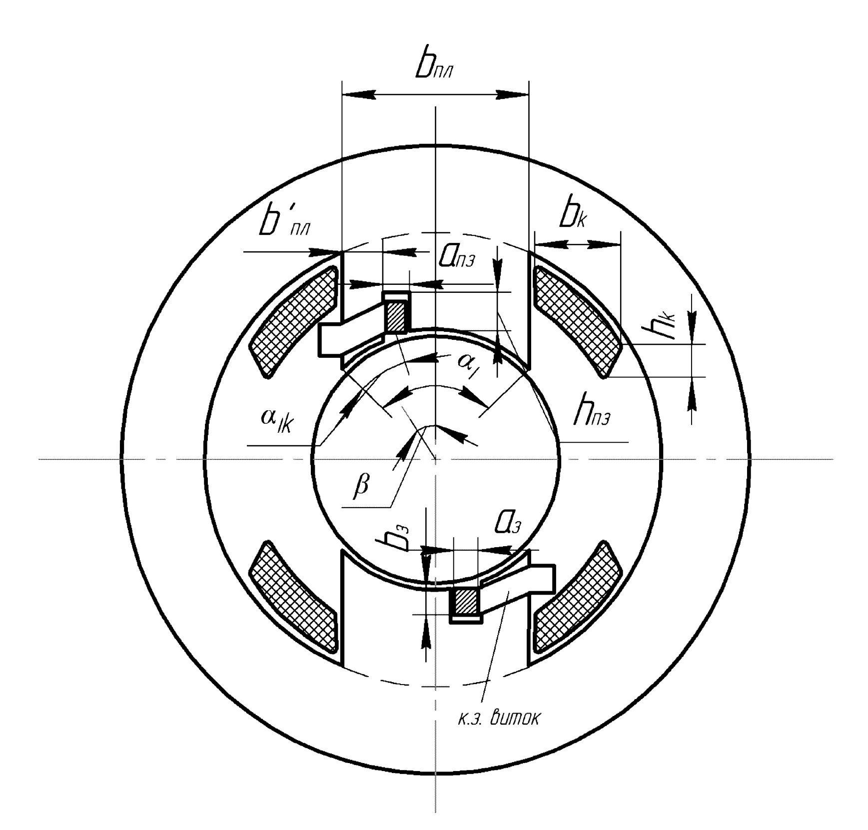


Рисунок 7.1 – Поперечный разрез однофазного асинхронного двигателя

Пространственный угол сдвига между осями главной обмотки полюса и короткозамкнутого витка:

$$\beta = \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\alpha_{i\,k}}{2}. \quad (7.10)$$

Расчетное активное сопротивление $2p$ последовательно соединенных короткозамкнутых витков, приведенное к числу витков главной обмотки статора, в однофазных асинхронных двигателях малой мощности с экранированными полюсами составляет величину порядка, *Ом*:

$$r_з^` = (2-12)2p\,r_1 . \qquad (7.11)$$

Обмоточный коэффициент короткозамкнутого витка:

$$k_{w\,з} = \sin\left(\frac{\alpha_{i\,k}}{\alpha_i}\frac{\pi}{2}\right). \qquad (7.12)$$

Действительное активное сопротивление одного короткозамкнутого витка, *Ом*:

$$r_з = \frac{r_з^`}{2p}\cdot\frac{k_{w\,з}^2}{W_1^2}. \qquad (7.13)$$

Размеры короткозамкнутого витка по рисунку 7.1, *м*:

$$a_з \approx \left(\frac{1}{2}-\frac{1}{3}\right)\cdot b_{пл}^` . \qquad (7.14)$$

Полученное значение округляют до десятых долей миллиметра.

Средняя длина короткозамкнутого витка, *м*:

$$l_{ср\,з} = 2l_o + 2\left(b_{пл}^` + a_з\right). \qquad (7.15)$$

Поперечное сечение короткозамкнутого витка, $м^2$:

$$q_{а\,з} = k_{\theta\,в} \frac{l_{ср\,з}}{\gamma_в\, r_з}, \tag{7.16}$$

где $\gamma_в$ – удельная электрическая проводимость материала короткозамкнутого витка;

$k_{\theta\,в}$ – коэффициент увеличения сопротивления по (7.3).

Высота короткозамкнутого витка, *м*:

$$b_з = \frac{q_{а\,з}}{a_з}. \tag{7.17}$$

Полученное значение округляют до десятых долей миллиметра.

Уточняем поперечное сечение короткозамкнутого витка, $м^2$:

$$q_{а\,з} = a_з b_з. \tag{7.18}$$

Уточняем активное сопротивление короткозамкнутого витка, *Ом*:

$$r_з = k_{\theta\,в} \frac{l_{ср\,з}}{\gamma_в\, q_{а\,з}}. \tag{7.19}$$

Приведенное активное сопротивление $2p$ последовательно соединенных короткозамкнутых витков, *Ом*:

$$r'_з = \frac{r_з\, 2p\, W_1^2}{k_{w\,з}^2}. \tag{7.20}$$

Ширина выреза на полюсе, *м*:

$$a_{п\,з} = a_з + 1 \cdot 10^{-3}. \qquad (7.21)$$

Высота выреза на полюсе, *м*:

$$h_{п\,з} = b_з + 1 \cdot 10^{-3}. \qquad (7.22)$$

Удельная магнитная проводимость для потока рассеяния в пазу, *Гн/м*:

$$\lambda_{п\,з} = 0{,}4\pi \frac{h_{п\,з}}{3\,a_{п\,з}} \cdot 10^{-6}. \qquad (7.23)$$

Удельная магнитная проводимость для потока лобового рассеяния витка, *Гн/м*:

$$\lambda_{л\,з} = 0{,}3\left(\frac{l_{ср\,з}}{l_о} - 1\right) \cdot 10^{-6}. \qquad (7.24)$$

Полная удельная магнитная проводимость для потоков рассеяния витка, *Гн/м*:

$$\lambda_з = \lambda_{п\,з} + \lambda_{л\,з}. \qquad (7.25)$$

Индуктивное сопротивление одного короткозамкнутого витка, *Ом*:

$$x_з = 2\pi\, f_1\, \lambda_з\, l_о. \qquad (7.26)$$

Полное сопротивление одного короткозамкнутого витка, *Ом*:

$$\underline{Z}_з = r_з + j \cdot x_з. \quad (7.27)$$

Приведенное к числу витков главной обмотки статора расчетное индуктивное сопротивление $2p$ последовательно соединенных короткозамкнутых витков, *Ом*:

$$x'_з = 2p\, x_з \frac{W_1^2}{k_{w\,з}^2}. \quad (7.28)$$

Расчетное полное приведенное сопротивление $2p$ последовательно соединенных короткозамкнутых витков, *Ом*:

$$\underline{Z}'_з = r'_з + j \cdot x'_з. \quad (7.29)$$

Приведенное к числу витков главной обмотки статора индуктивное сопротивление взаимоиндукции между этой обмоткой и короткозамкнутым витком, *Ом*:

$$x_m = \frac{\alpha_{i\,k}}{\alpha_i} \cdot \frac{x_o}{p}. \quad (7.30)$$

7.3 Расчет активного и индуктивного сопротивлений короткозамкнутой обмотки ротора

Активное сопротивление стержня ротора, *Ом*:

$$r_{cm} = k_{\theta\, p} \frac{l_o}{\gamma_p\ q_{cm}}, \qquad (7.31)$$

где γ_p – удельная электрическая проводимость материала короткозамкнутой обмотки ротора;

$k_{\theta\, p}$ – коэффициент увеличения сопротивления по (7.3).

Активное сопротивление сегмента короткозамыкающего кольца между двумя стержнями, *Ом*:

$$r_k = k_{\theta\, p} \frac{\pi\, D_k}{\gamma_p\, z_2\, q_k}. \qquad (7.32)$$

Активное сопротивление беличьей клетки ротора, *Ом*:

$$r_2 = r_{cm} + \frac{r_k}{2\sin^2 \dfrac{\pi\, p}{z_2}}. \qquad (7.33)$$

Приведенное активное сопротивление беличьей клетки ротора, *Ом*:

$$r_2^{`} = \frac{4m_1 \left(k_{w1} W_1\right)^2}{z_2} r_2. \qquad (7.34)$$

Удельная магнитная проводимость пазового рассеяния, *Гн/м*:

$$\lambda_{n2} = 0{,}785 - \frac{b_{ш2}}{2d_{n2}} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}. \qquad (7.35)$$

Удельная магнитная проводимость лобового рассеяния, *Гн/м*:

$$\lambda_{л2} = \frac{2{,}3 D_{кл}}{4\, z_2\, l_o \sin\left(\frac{\pi\ p}{z_2}\right)^2} \log\left(\frac{4{,}7 D_{кл}}{2 a_{кл} \cdot 10^{-3} + b_{кл} \cdot 10^{-3}}\right). \tag{7.36}$$

Коэффициент удельной магнитной проводимости дифференциального рассеяния, *Гн/м*:

$$\lambda_{д2} = \frac{t_2}{12\, \delta\, k_\delta} \xi, \tag{7.37}$$

где $\xi = 1 + \frac{1}{5}\left(\frac{\pi\ p}{z_2}\right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{z_2}\right)^2}$; Δ_z – находят по кривым рисунка 7.2.

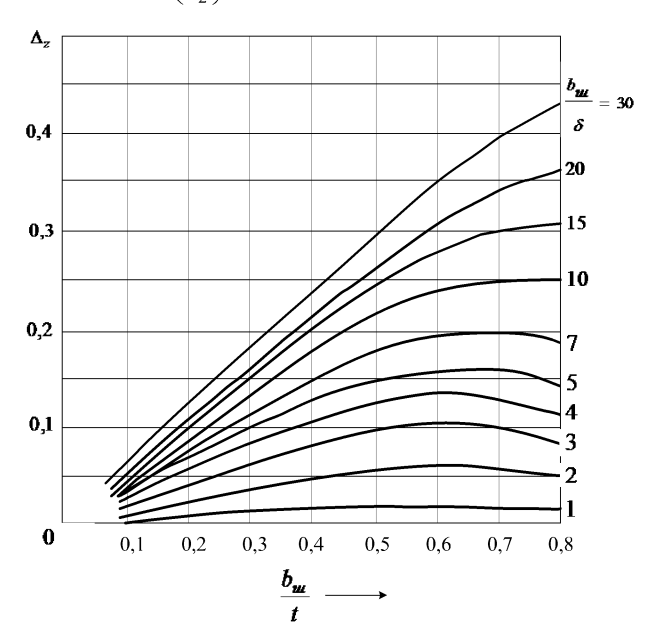


Рисунок 7.2 – Коэффициент Δ_z к расчету проводимости дифференциального рассеяния

Индуктивное сопротивление рассеяния беличьей клетки ротора, *Ом*:

$$x_2 = 2\pi f_1 l_o \left(\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}\right) \cdot 10^{-6}. \quad (7.38)$$

Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния короткозамкнутой обмотки ротора, *Ом*:

$$x_2^` = \frac{4m_1 \left(k_{w1} W_1\right)^2}{z_2} x_2. \quad (7.39)$$

8 Потери мощности в режиме холостого хода двигателя

Потери мощности в асинхронных электродвигателях малой мощности слагаются из следующих видов:

1) Магнитных потерь на гистерезис и вихревые токи в стали статора;
2) Электрических потерь в обмотках статора;
3) Механических потерь (трение в подшипниках, ротора о воздух, вентиляция);
4) Добавочных потерь.

8.1 Магнитные потери в активной стали асинхронного двигателя

В однофазных асинхронных двигателях малой мощности с беличьей клеткой ротора, с эллиптическим магнитным полем магнитные потери в стали двигателя можно представить приближенно как сумму потерь от «прямого» и «обратного» полей. Однако сложность определения индукций от этих полей в магнитной системе малых асинхронных двигателей не оправдывает получаемой точности результатов при вычислении магнитных потерь в них. Так как во мно-

гих случаях ротор малого асинхронного двигателя является ненасыщенным, то магнитными потерями в нем без большой погрешности практически можно пренебречь, а учитывать только потери в стали статора. Поэтому этот расчет здесь опускается.

Магнитные потери в стали двигателя состоят из потерь в полюсах и сердечнике статора, *Вт*:

$$P_{cт} = P_{c\,пл} + P_{c\,c}\,. \tag{8.1}$$

Потери в полюсах статора, *Вт*:

$$P_{c\,пл} = \beta_c B_{пл}^2 \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} G_{пл}, \tag{8.2}$$

где $G_{пл}$ – масса полюсов статора;

β_c – удельные потери в стали (таблица 8.1).

Таблица 8.1 – Удельные потери в стали асинхронных двигателей при толщине листов 0,5 мм

Марка стали	β_c, *Вт/кг*
2013, 2011, 2211	2,5 – 2,6
2312	1,75

Масса полюсов статора, *кг*:

$$G_{пл} = 2p\,\gamma_{cт}\,h_{пл}\,b_{пл}\,l_{пл}\,k_c\,. \tag{8.3}$$

где $\gamma_{cт} = 7800$ *кг/м*^{3} – удельная масса стали.

Потери в сердечнике статора, *Вт*:

$$P_{c\,c} = \beta_c B_c^2 \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} G_c, \tag{8.4}$$

где G_c – масса сердечника статора, *кг*:

$$G_c = \pi\,\gamma_{cm}\left(D_н - h_c\right) h_c\, l_o\, k_c\,. \tag{8.5}$$

8.2 Электрические потери в обмотках статора

Электрические потери в главной обмотке статора от намагничивающей составляющей полного тока, *Вт*:

$$P_{м10} = I_{or}^2\, r_1\,. \tag{8.6}$$

ЭДС короткозамкнутого витка, *В*:

$$E_{кз} = 4{,}44\,\frac{\alpha_{ik}}{\alpha_i}\,\varPhi\, f_1\,. \tag{8.7}$$

Ток короткозамкнутого витка, *А*:

$$I_{кз} = \frac{E_{кз}}{\left|\underline{Z}_з\right|}\,. \tag{8.8}$$

Электрические потери в короткозамкнутых витках статора, *Вт*:

$$P_{кз} = 2\,p\, I_{кз}^2\, r_з\,, \tag{8.9}$$

8.3 Механические потери

Механические потери состоят из потерь на трение в подшипниках и потерь на трение о воздух, *Вт*:

$$P_{мх} = P_{тр\ п} + P_{тр\ в}. \qquad (8.10)$$

Потери на трение в подшипниках, *Вт*:

$$P_{тр\ п} = k_m G_p n_2 \cdot 10^{-3}, \qquad (8.11)$$

где $k_m = 1-3$ – коэффициент определяется по опытным данным, большее его значение относится к электродвигателям с меньшими мощностями;

G_p – масса ротора;

n_2 – скорость вращения ротора при нагрузке (предварительно можно принять $n_2 = n_1$).

Масса ротора с беличьей клеткой, *кг*:

$$G_p = \gamma'_p \frac{\pi}{4} D_p^2\ l_o, \qquad (8.12)$$

где $\gamma'_p \approx 7800$ *кг/м*^{3} – средняя объемная масса ротора.

Потери на трение о воздух, *Вт*:

$$P_{тр\ в} = 2 D_p^3\ n_2^3\ l_o \cdot 10^{-6}. \qquad (8.13)$$

Добавочные потери в асинхронных двигателях возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, не синусоидальности кривых распределения МДС обмоток статора и ротора и ряда других причин. Данные потери будут учтены при расчете КПД двигателя при номинальной нагрузке.

Предварительное значение суммарных потерь в двигателе в режиме холостого хода, *Вт*:

$$P_{\Sigma} = P_{cm} + P_{кз} + P_{м10} + P_{мх}. \qquad (8.14)$$

Активная составляющая тока холостого хода двигателя, *А*:

$$I_{oa} = \frac{P_{\Sigma}}{U_1}. \qquad (8.15)$$

Ток холостого хода двигателя, *А*:

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{or}^2}. \qquad (8.16)$$

Активное сопротивление намагничивающего контура, эквивалентное магнитным потерям в стали статора, *Ом*:

$$r_o = \frac{P_{cm}}{2\, I_o^2}. \qquad (8.17)$$

Коэффициент мощности в режиме холостого хода:

$$\cos\varphi_o = \frac{I_{oa}}{I_o}. \qquad (8.18)$$

9 Вращающий момент однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами

Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в беличьей клетке ротора токи, взаимодействие которых с данным полем создает пусковой и вращающий моменты двигателя. Применяя для анализа рабочего процесса рассматриваемого однофазного асинхронного двигателя теорию двух вращающихся в противоположные стороны «прямого» и «обратного» магнитных полей, можно представить вращающий момент двигателя в следующем виде, $H \cdot м$:

$$M = \frac{1}{\omega_1}\left(\begin{matrix}\left[\dot{I}_1^2 + \dot{I}_з'^2 - 2\dot{I}_1 \dot{I}_з' \cos(\varphi_1 - \varphi_з)\cos\beta\right](R_f - R_b) + \\ + 2\dot{I}_1 \dot{I}_з' (R_f + R_b)\sin(\varphi_1 - \varphi_з)\sin\beta\end{matrix}\right), \quad (9.1)$$

где $\dot{I}_1$ – ток главной обмотки статора;

$\dot{I}_з'$ – ток короткозамкнутого витка;

φ_1 и $\varphi_з$ – фазные углы сдвига токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_з'$ относительно первичного напряжения $\dot{U}_1$ (рисунок 9.1);

R_f, R_b – активные сопротивления намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для прямого и обратного полей;

ω_1 – синхронная угловая скорость вращения поля, $\omega_1 = {}^{2\pi f_1}/_{p}$.

Для определения φ_1 и $\varphi_з$ необходимо токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_з'$ представить в показательной форме. Аргумент тока $\dot{I}_1$ будет углом φ_1, а аргумент тока $\dot{I}_з'$ будет углом $\varphi_з$.

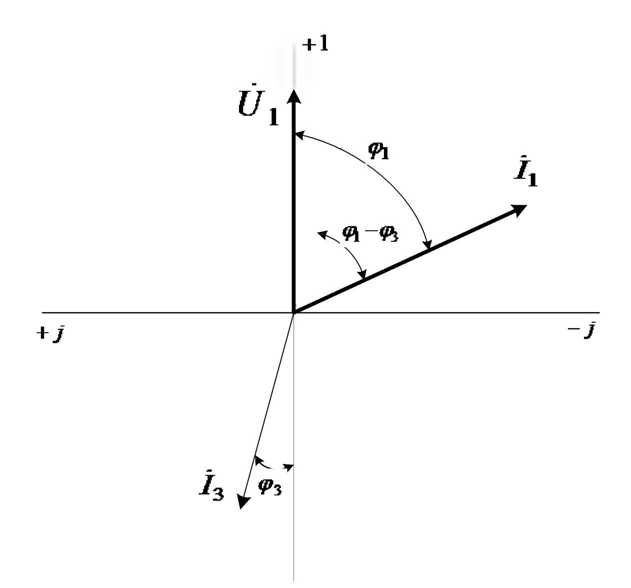


Рисунок 9.1 – Векторная диаграмма токов асинхронного двигателя с расщепленными полюсами

Ток главной обмотки статора, A:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1\left(\underline{Z}'_з + \underline{Z}_f + \underline{Z}_b\right)}{\underline{Q}}, \tag{9.2}$$

где $\underline{Z}_f$, $\underline{Z}_b$ – полные сопротивления намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для прямого и обратного полей.

Ток короткозамкнутого витка, A:

$$\dot{I}'_з = -\frac{\dot{U}_1\left[\underline{Z}_m + \left(\underline{Z}_f + \underline{Z}_b\right)cos\,\beta + j\left(\underline{Z}_f - \underline{Z}_b\right)sin\,\beta\right]}{\underline{Q}}, \tag{9.3}$$

где

$$\underline{Q} = \left(\underline{Z}_f + \underline{Z}_b\right)\left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}'_з - 2\underline{Z}_m \cos\beta\right) + 4\underline{Z}_f \underline{Z}_b \sin^2\beta + \underline{Z}_1\underline{Z}'_з - \underline{Z}_m^2, \qquad (9.4)$$

где $\underline{Z}_m$ – сопротивление взаимной индукции между главной обмоткой и короткозамкнутым витком.

Активное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для прямого поля, *Ом*:

$$R_f = \frac{\frac{r'_2}{s}\left(r_o^2 + x_o^2\right) + r_o\left(\frac{r'^2_2}{s^2} + x'^2_2\right)}{\left(\frac{r'_2}{s} + r_o\right)^2 + \left(x'_2 + x_o\right)^2}. \qquad (9.5)$$

Активное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для обратного поля, *Ом*:

$$R_b = \frac{\frac{r'_2}{2-s}\left(r_o^2 + x_o^2\right) + r_o\left(\frac{r'^2_2}{(2-s)^2} + x'^2_2\right)}{\left(\frac{r'_2}{2-s} + r_o\right)^2 + \left(x'_2 + x_o\right)^2}. \qquad (9.6)$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для прямого поля, *Ом*:

$$X_f = \frac{x'_2\left(r_o^2 + x_o^2\right) + x_o\left(\frac{r'^2_2}{s^2} + x'^2_2\right)}{\left(\frac{r'_2}{s} + r_o\right)^2 + \left(x'_2 + x_o\right)^2}. \qquad (9.7)$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для обратного поля, *Ом*:

$$X_b = \frac{x_2'\left(r_o^2 + x_o^2\right) + x_o\left(\frac{r_2'^2}{(2-s)^2} + x_2'^2\right)}{\left(\frac{r_2'}{2-s} + r_o\right)^2 + \left(x_2' + x_o\right)^2}. \tag{9.8}$$

Полное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для прямого поля, *Ом*:

$$\underline{Z}_f = R_f + jX_f. \tag{9.9}$$

Полное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для обратного поля, *Ом*:

$$\underline{Z}_b = R_b + jX_b. \tag{9.10}$$

Сопротивление взаимной индукции между главной обмоткой и короткозамкнутым витком, *Ом*:

$$\underline{Z}_m = jx_m. \tag{9.11}$$

Для определения номинального скольжения необходимо рассчитать номинальный нагрузочный момент, и построить его на одном графике с электромагнитным моментом. Точка пересечения этих моментов позволит определить номинальное скольжение $s_н$ и номинальные токи обмоток $I_{1н}$, $I'_{зн}$ (рисунок 9.2).

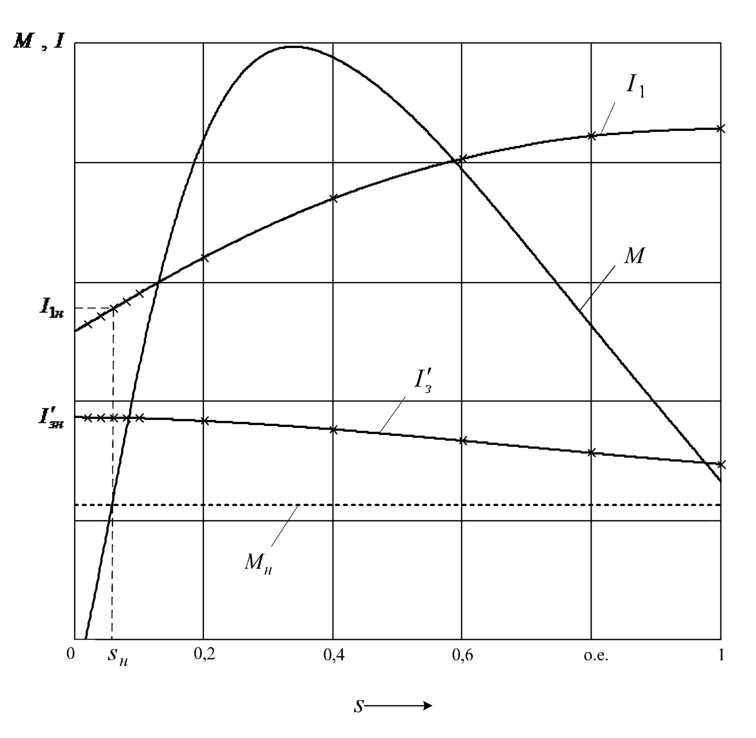


Рисунок 9.2 – Пусковые характеристики спроектированного двигателя

Номинальный момент, $Н \cdot м$:

$$M_н = 9{,}55 \cdot \frac{P_2}{0{,}9 \cdot n_1}. \tag{9.12}$$

Кратность пускового момента:

$$K_м = \frac{M_{(s=1)}}{M_н}. \tag{9.13}$$

Кратность пускового тока:

$$K_I = \frac{I_{1(s=1)}}{I_{1н}}. \quad (9.14)$$

10 Потери и коэффициент полезного действия

Электрические потери в главной обмотке статора, *Вт*:

$$P_{м1} = I_{1н}^2 \cdot r_1. \quad (10.1)$$

Электрические потери в короткозамкнутых витках статора, *Вт*:

$$P_{мз} = \left(I'_{зн}\right)^2 \cdot r'_з. \quad (10.2)$$

Электрические потери в короткозамкнутой обмотке ротора, *Вт*:

$$P_{м2} = k^2 \cdot I_{1н}^2 \cdot r'_2. \quad (10.3)$$

Суммарные потери в двигателе при номинальной нагрузке, *Вт*:

$$P_\Sigma = \zeta_o\left(P_{м1} + P_{мз} + P_{м2} + P_{ст} + P_{мх}\right), \quad (10.4)$$

где $\zeta_o = 1{,}06 - 1{,}1$ – коэффициент, учитывающий добавочные потери в электродвигателе.

Коэффициент полезного действия, %:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_\Sigma} \cdot 100. \qquad (10.5)$$

Для определения номинального коэффициента мощности необходимо построить зависимость $\varphi_1 = f(s)$ (рисунок 10.1). При номинальном скольжении определяем $\varphi_{1н}$, и вычисляем $\cos(\varphi_{1н})$.

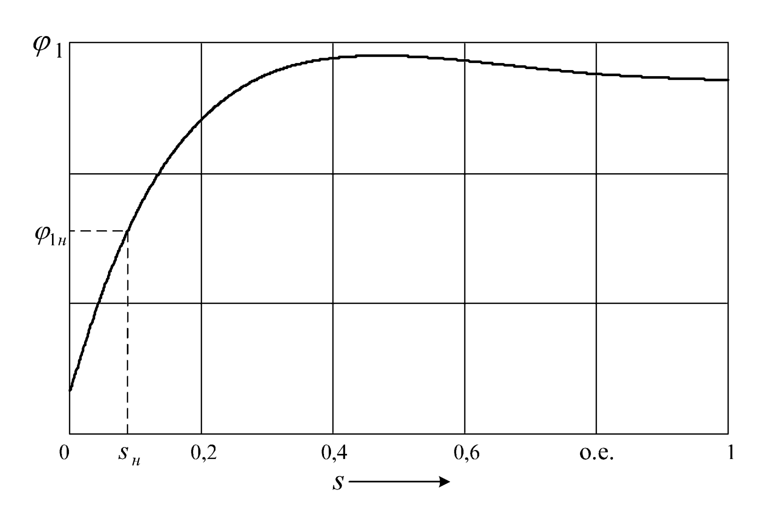


Рисунок 10.1 – К определению номинального коэффициента мощности

11 Пример расчета однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами

11.1 Техническое задание

Спроектировать асинхронный однофазный двигатель с расщепленными или экранированными полюсами статора и короткозамкнутым ротором. Исходные данные расчета: $P_2 = 10$ Вт, $2p = 2$, $U_1 = 220$ В, $f_1 = 50$ Гц, режим работы двигателя – продолжительный, исполнение двигателя – открытое, защищенное.

11.2 Основные размеры однофазного асинхронного электродвигателя с явнополюсным статором

Расчетная мощность по (2.2):

$$P_a = \zeta \frac{P_2 \cdot 10^{-3}}{\eta \cos\varphi_1} = 0{,}88 \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0{,}125} = 0{,}0704 \ \text{кВт},$$

где $\zeta = 0{,}88$ – по (2.3);

$\eta \cos\varphi_1 = 0{,}125$ – по рисунку 1.

Машинная постоянная по (2.4):

$$C = \frac{5{,}5 \cdot 10^3}{\alpha \, B_\delta AS} = \frac{5500}{0{,}75 \cdot 0{,}43 \cdot 7300} = 2{,}336,$$

где $\alpha = 0{,}75$;

$B_\delta = 0{,}43 \ \text{Тл}$ – по рисунку 3;

$AS = 7300 \ A/м$ – по рисунку 3;

Синхронная скорость вращения по (2.5):

$$n_1 = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ } \textit{об/мин.}$$

Диаметр расточки пакета статора по (2.7):

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{C\,P_a}{\xi\, n_1}} = \sqrt[3]{\frac{2{,}336 \cdot 0{,}0704}{1 \cdot 3000}} = 0{,}038 \text{ } \textit{м},$$

где $\xi = 1 -$ по (2.6).

Длина пакета статора по (2.8):

$$l_o = \xi \cdot D_a = 1 \cdot 0{,}038 = 0{,}038 \text{ } \textit{м}.$$

Полюсный шаг по (2.9):

$$\tau = \frac{\pi\, D_a}{2p} = \frac{\pi \cdot 0{,}038}{2} = 0{,}06 \text{ } \textit{м}.$$

Расчетная полюсная дуга по (2.10):

$$b_o = \alpha\tau = 0{,}75 \cdot 0{,}06 = 0{,}045 \text{ } \textit{м}.$$

11.3 Главная обмотка статора

Номинальный ток главной обмотки статора по (3.1):

$$I_1 = \frac{P_2}{U_1\,\eta\cos\varphi_1} = \frac{10}{220\cdot 0{,}125} = 0{,}364\ A.$$

Амплитуда полезного магнитного потока двигателя по (3.2):

$$\varPhi = B_\delta\, b_o\, l_o = 0{,}43\cdot 0{,}045\cdot 0{,}038 = 7{,}315\cdot 10^{-4}\ Вб.$$

ЭДС главной обмотки статора по (3.3):

$$E_1 = \zeta\cdot U_1 = 0{,}88\cdot 220 = 193{,}6\ В.$$

Число витков главной обмотки статора, приходящихся на полюс по (3.4):

$$W_1 = \frac{E_1}{2p\cdot 4{,}44 f_1 \varPhi} = \frac{193{,}6}{2\cdot 4{,}44\cdot 50\cdot 7{,}315\cdot 10^{-4}} = 596{,}08.$$

Принимаем $W_1 = 596$.

Ориентировочное сечение провода главной обмотки статора по (3.5):

$$q_{a1}^{`} = \frac{I_1}{j_1^{`}} = \frac{0{,}364}{4} = 0{,}091\ мм^2,$$

где $j_1^{`} = 4$ $А/мм^2$.

Принимаем провод марки ПЭТВ: $n_{эл} = 1$, $q_{эл}$ = 0,099 $мм^2$, $d_{из}$ = 0,395 $мм$, $d_г$ = 0,355 $мм$.

Сечение провода главной обмотки статора по (3.6):

$$q_{a1} = q_{эл} n_{эл} = 1\cdot 0{,}099 = 0{,}099\ мм^2.$$

Полученная плотность тока в главной обмотке статора по (3.7):

$$j_1 = \frac{I_1}{q_{a1}} = \frac{0{,}364}{0{,}099} = 3{,}673\ \ A/\,мм^2.$$

Длина полюса статора по (3.8):

$$l_{пл} = l_o = 0{,}038\ м.$$

Высота сердечника полюса по (3.9):

$$h_{пл} = 0{,}4 \cdot 0{,}038 = 0{,}015\ м.$$

Поперечное сечение сердечника полюса по (3.10):

$$S_{пл} = \frac{\Phi \cdot \sigma}{B_{пл} k_c} = \frac{7{,}315 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}2}{0{,}9 \cdot 0{,}97} = 1{,}006 \cdot 10^{-3}\ м^2,$$

где $\sigma = 1{,}2$ - коэффициент магнитного рассеяния главной обмотки статора;

$B_{пл} = 0{,}9\ \ Тл$– индукция в сердечнике полюса;

$k_c = 0{,}97$ - коэффициент заполнения пакета сталью.

Ширина сердечника полюса по (3.11):

$$b_{пл} = \frac{S_{пл}}{l_{пл}} = \frac{1{,}006 \cdot 10^{-3}}{0{,}038} = 0{,}0265\ м.$$

Требуемая площадь окна для размещения главной обмотки на полюсе по (3.12):

$$S_{a1} = \frac{W_1 n_{эл} d_{из}^2 10^{-6}}{f_o^{`}} = \frac{596 \cdot 1 \cdot 0{,}395^2 \cdot 10^{-6}}{0{,}82} = 1{,}134 \cdot 10^{-4}\ м^2,$$

где $f_o^{`} = 0{,}82$ – коэффициент, учитывающий возможные неточности намотки рядов обмоточного провода в катушке.

Высота катушки по (3.13):

$$h_k = 0{,}4\ h_{пл} = 0{,}4 \cdot 0{,}015 = 6 \cdot 10^{-3}\ м.$$

Ширина катушки по (3.14):

$$b_k = \frac{S_{a1}}{h_k} = \frac{1{,}134 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 10^{-3}} = 0{,}019\ м.$$

Высота сердечника пакета статора по (3.15):

$$h_c = \frac{\Phi \cdot \sigma}{2\ l_o\ B_c\ k_c} = \frac{7{,}315 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}2}{2 \cdot 0{,}038 \cdot 1 \cdot 0{,}97} = 0{,}012\ м,$$

где $B_c = 1\ Тл$ – индукция в сердечнике статора.

Наружный диаметр пакета статора по (3.16):

$$D_н = D_a + 2\left(h_{пл} + h_c\right) = 0{,}038 + 2\left(0{,}015 + 0{,}012\right) = 0{,}092\ м.$$

11.4 Выбор воздушного зазора

В однофазных асинхронных двигателях с экранированными полюсами воздушный зазор между расточкой статора и ротором обычно находится в пре-

делах: $\delta = 0{,}2 - 0{,}4\,мм$. При этом величина зазора должна быть кратна значению 0,05.

Принимаем $\delta = 0{,}2\ м$.

11.5 Расчет короткозамкнутого ротора

Диаметр ротора асинхронного двигателя по (5.1):

$$D_p = D_a - 2\delta = 0{,}038 - 2 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-3} = 37{,}6 \cdot 10^{-3}\ м.$$

Принимаем $z_2 = 14$ – число пазов ротора.

Зубцовое деление ротора по (5.6):

$$t_2 = \frac{\pi D_p}{z_2} = \frac{\pi \cdot 37{,}6 \cdot 10^{-3}}{14} = 8{,}437 \cdot 10^{-3}\ м.$$

Внутренний диаметр магнитопровода равен диаметру вала по (5.7):

$$d_{вл} = 0{,}2 \cdot 37{,}6 \cdot 10^{-3} = 7{,}52 \cdot 10^{-3}\ м.$$

Принимаем $d_{вл} = 7{,}5\ мм$.

Ток стержня короткозамкнутого ротора с беличьей клеткой по (5.8):

$$I_{cm} = k\frac{2m_1 k_{w1} W_1}{z_2} I_1 = 0{,}5 \cdot \frac{2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 596}{14} \cdot 0{,}364 = 15{,}48\ A,$$

где $k = 0{,}5$ – отношение магнитодвижущих сил обмоток ротора и статора;

$m_1 = 1$ – число фаз статора;

$k_{w1} = 1$ – обмоточный коэффициент главной обмотки статора.

Ток короткозамыкающего кольца ротора по (5.9), *А*:

$$I_{кл} = k\frac{m_1 k_{w1} W_1}{z_2 \sin\left(\frac{\pi\ p}{z_2}\right)} I_1 = 0{,}5 \cdot \frac{1 \cdot 1 \cdot 596}{14 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 1}{14}\right)} \cdot 0{,}364 = 34{,}78\ A.$$

Предварительное значение площади поперечного сечения стержня ротора по (5.10):

$$q_{ст}^{`} = \frac{I_{ст}}{J_{ст}} = \frac{15{,}48}{9} = 1{,}72\ мм,$$

где $J_{ст} = 9\ \frac{A}{мм^2}$ – плотность тока в стержне ротора.

Диаметр стержня ротора по (5.11):

$$d_{ст} = \sqrt{\frac{4\ q_{ст}^{`}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}72}{\pi}} = 1{,}482\ мм.$$

Принимаем $d_{ст} = 1{,}5\ мм$.

Уточняем площадь поперечного сечения стержня по (5.12):

$$q_{ст} = \frac{\pi\ d_{ст}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1{,}5^2}{4} = 1{,}762\ мм^2.$$

Уточняем плотность тока в стержне ротора по (5.13):

$$J_{ст} = \frac{I_{ст}}{q_{ст}} = \frac{15{,}48}{1{,}762} = 8{,}79\ \frac{A}{мм^2}.$$

Предварительное значение площади поперечного сечения кольца ротора по (5.14):

$$q_{кл}^{`} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{34,78}{10} = 3,478\ мм^2.$$

где $J_{кл} = 10\ \frac{A}{мм^2}$ – плотность тока в кольце ротора.

Высота кольца ротора по (5.15):

$$b_{кл} = (1,2 - 1,25)d_{ст} = 1,25 \cdot 1,5 = 1,875\ мм.$$

Принимаем $b_{кл} = 1,9\ мм.$

Толщина кольца ротора по (5.16):

$$a_{кл} = \frac{q_{кл}^{`}}{b_{кл}} = \frac{3,478}{1,9} = 1,831\ мм.$$

Принимаем $a_{кл} = 1,8\ мм.$

Уточняем площадь поперечного сечения кольца по (5.17):

$$q_{кл} = a_{кл} b_{кл} = 1,8 \cdot 1,9 = 3,42\ мм^2.$$

Уточняем плотность тока в короткозамыкающем кольце по (5.18):

$$J_{кл} = \frac{I_{кл}}{q_{кл}} = \frac{34,78}{3,42} = 10,17\ \frac{A}{мм^2}.$$

Средний диаметр короткозамыкающих колец по (5.19):

$$D_{кл} = D_p - b_{кл} \cdot 10^{-3} = 37{,}6 \cdot 10^{-3} - 1{,}9 \cdot 10^{-3} = 35{,}7 \cdot 10^{-3}\ м.$$

В асинхронных микродвигателях пазы ротора выполняются полузакрытыми (рисунок 11.1). Размеры шлицевой части паза: $b_{ш2} = 1$ мм, $h_{ш2} = 0{,}5$ мм.

Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется литой из алюминия.

Диаметр паза ротора:

$$d_{п2} = d_{ст} = 1{,}5\ мм.$$

Полная высота паза ротора по (5.20):

$$h_{п2} = d_{п2} + h_{ш2} = 1{,}5 + 0{,}5 = 2\ мм.$$

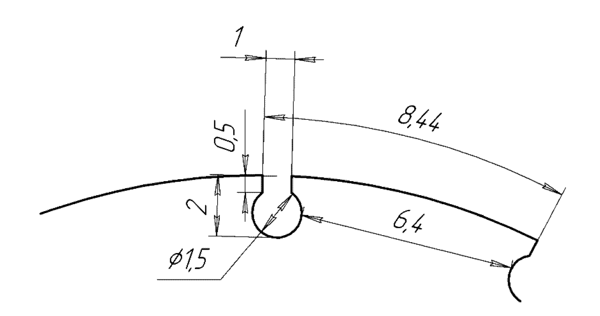


Рисунок 11.1 – Паз ротора

Ширина зубца ротора по (5.21):

$$b_{з2} = \pi \frac{D_p - (2h_{ш2} + d_{п2}) \cdot 10^{-3}}{z_2} - d_{п2} \cdot 10^{-3} =$$

$$= \pi \cdot \frac{37{,}6 \cdot 10^{-3} - (2 \cdot 0{,}5 + 1{,}5) \cdot 10^{-3}}{14} - 1{,}5 \cdot 10^{-3} = 6{,}38 \cdot 10^{-3}\ м.$$

11.6 Расчет магнитной цепи

Коэффициент воздушного зазора по (6.2):

$$k_\delta = \frac{t_2 + 10\delta}{t_2 - b_{ш2} + 10\delta} = \frac{8,44 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{8,44 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}} = 1,106.$$

Магнитное напряжение воздушного зазора равна по (6.1):

$$F_\delta = 1,59 B_\delta k_\delta \delta \cdot 10^6 = 1,59 \cdot 0,43 \cdot 1,106 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 152,2\ А.$$

Индукция в сердечнике полюса по (6.3):

$$B_{пл} = \frac{\Phi\ \sigma}{l_{пл}\ b_{пл}\ k_c} = \frac{7,315 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2}{0,038 \cdot 0,026 \cdot 0,97} = 0,9\ Тл.$$

Магнитное напряжение сердечников полюсов статора по (6.4):

$$F_{пл} = 2 H_{пл} h_{пл} = 2 \cdot 286 \cdot 0,015 = 8,69\ А,$$

где $H_{пл} = 286 \frac{А}{м}$ – напряженность магнитного поля в полюсе статора. Определяется по значению магнитной индукции в сердечнике полюса по кривым намагничивания, приложение Б, таблица Б1.

Индукция в сердечнике статора по (6.5):

$$B_c = \frac{\Phi\ \sigma}{2\ l_o\ h_c\ k_c} = \frac{7,315 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2}{2 \cdot 0,038 \cdot 0,012 \cdot 0,97} = 1\ Тл.$$

Средняя длина магнитного потока в сердечнике по (6.6):

$$L_c = \frac{\pi\left(D_н - h_c\right)}{2p} = \frac{\pi \cdot \left(0{,}092 - 0{,}012\right)}{2} = 0{,}126 \ м.$$

Магнитное напряжение сердечника статора по (6.7):

$$F_c = H_c L_c = 185 \cdot 0{,}126 = 23{,}3 \ A,$$

где $H_c = 185 \dfrac{A}{м}$. Определяется по значению магнитной индукции в сердечнике статора по кривым намагничивания, приложение Б, таблица Б2.

Индукция в узком сечении зубца ротора при круглом пазе по (6.8):

$$B_{з.р} = \frac{B_\delta \ t_2}{b_{з2} \ k_c} = \frac{0{,}43 \cdot 8{,}44 \cdot 10^{-3}}{6{,}38 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}97} = 0{,}59 \ Тл.$$

Магнитное напряжение зубцов ротора по (6.9):

$$F_{з.р} = 2H_{з.р} h_{п2} 10^{-3} = 2 \cdot 184 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0{,}74 \ A,$$

где $H_{з.р} = 184 \ \dfrac{A}{м}$.

Высота сердечника ротора по (6.11):

$$h_p = \frac{D_p - 2h_{п2} \cdot 10^{-3} - d_{вл}}{2} = \frac{37{,}6 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} - 7{,}5 \cdot 10^{-3}}{2} = 0{,}013 \ м.$$

Индукция в сердечнике ротора по (6.10):

$$B_p = \frac{\Phi}{2\,l_o\,h_p\,k_c} = \frac{7{,}315 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0{,}038 \cdot 0{,}013 \cdot 0{,}97} = 0{,}76\ \text{Тл}.$$

Средняя длина пути магнитного потока в роторе по (6.12):

$$L_p = \frac{\pi\left(D_p - 2h_{n2} \cdot 10^{-3} - h_p\right)}{2p} = \frac{\pi \cdot \left(37{,}6 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} - 0{,}013\right)}{2} = 0{,}032\ \text{м}.$$

Намагничивающая сила сердечника ротора по (6.13):

$$F_p = H_p L_p = 113 \cdot 0{,}032 = 3{,}65\ A,$$

где $H_p = 113\ \frac{A}{м}$.

Общая намагничивающая сила холостого хода обмотки статора, приходящаяся на пару полюсов по (6.14):

$$F_\Sigma = F_\delta + F_{пл} + F_c + F_{з.р} + F_p = 152{,}18 + 8{,}69 + 23{,}34 + 0{,}74 + 3{,}65 = 188{,}6\ A.$$

Коэффициент насыщения магнитной системы двигателя по (6.15):

$$k_н = \frac{F_\Sigma}{F_\delta} = \frac{188{,}6}{152{,}18} = 1{,}24.$$

Намагничивающий ток по (6.16):

$$I_{or} = \frac{p\,F_\Sigma}{1{,}8 \cdot 2p\,W_1} = \frac{1 \cdot 188{,}6}{1{,}8 \cdot 2 \cdot 596} = 0{,}088\ A.$$

11.7 Параметры асинхронного двигателя для номинально режима

Расчет активного и индуктивного сопротивлений главной обмотки статора.

Средняя длина витка главной обмотки статора по (7.1):

$$l_{cp1}=2\left(\frac{b_o+b_{пл}}{2}+l_{пл}+2b_k\right)=2\left(\frac{0,045+0,026}{2}+0,038+2\cdot 0,019\right)=0,222\,м.$$

Коэффициент увеличения сопротивления главной обмотки статора при нагревании их от 20 до $75\,^oC$ по (7.3):

$$k_\theta=1+\alpha_t(\vartheta-20)=1+0,004\cdot(75-20)=1,22\,,$$

где $\alpha_t=0,004$ – температурный коэффициент для меди.

Активное сопротивление главной обмотки статора в нагретом состоянии при температуре $75\,^oC$ по (7.2):

$$r_1=k_\theta\frac{2p\ W_1\ l_{cp1}}{\gamma\ q_{a1}\cdot 10^{-6}}=1,22\frac{2\cdot 596\cdot 0,222}{57\cdot 10^6\cdot 0,099\cdot 10^{-6}}=57,17\ Ом,$$

где $\gamma\ =57\cdot 10^6\ \frac{м}{Ом\cdot м^2}$ – удельная электрическая проводимость материала обмотки статора при $t=20\,^oC$.

Индуктивное сопротивление контура намагничивания, приведенное к числу витков главной обмотки статора по (7.4):

$$x_o=7,8\,\alpha\ p\ f_1\,W_1^2\,\frac{\tau\,l_o\cdot 10^{-6}}{k_н k_\delta\delta}=$$

$$= 7{,}8 \cdot 0{,}75 \cdot 1 \cdot 50 \cdot 596^2 \cdot \frac{0{,}06 \cdot 0{,}038 \cdot 10^{-6}}{1{,}24 \cdot 1{,}106 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-3}} = 859{,}73\ Ом.$$

Индуктивное сопротивление главной обмотки статора по (7.5):

$$x_1 = 2\,\gamma_s\left(\sigma - 1\right)\,x_o = 2 \cdot 0{,}8 \cdot \left(1{,}2 - 1\right) \cdot 859{,}73 = 275{,}1\ Ом,$$

где $\gamma_s = 0{,}8$ – коэффициент сцепления потока рассеяния с главной обмоткой статора.

Полное сопротивление главной обмотки статора по (7.6):

$$\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1 = 57{,}17 + j \cdot 275{,}1\ Ом.$$

Расчет размеров и параметров пускового короткозамкнутого витка, экранирующего часть полюсного наконечника.

Короткозамыкающие витки выполняются из медной проволоки прямоугольного сечения. Электрический угол полюсной дуги одного полюса по (7.7):

$$\alpha_i = \frac{360\,p}{2} \cdot \frac{b_o}{\tau} = \frac{360 \cdot 1}{2} \cdot \frac{0{,}045}{0{,}06} = 135\ эл.\ град.$$

Электрический угол полюсной дуги экранируемой части полюса по (7.8):

$$\alpha_{i\,k} = k_{экр}\alpha_i = \frac{1}{4} \cdot 135 = 33{,}75\ эл.\ град.,$$

где $k_{экр} = 1/4$.

Полюсная дуга экранируемой части полюса по (7.9):

$$b_{пл}^{`} = (0,8 - 0,9) \cdot k_{экр} b_{пл} = 0,9 \cdot \frac{1}{4} \cdot 0,026 = 5,95 \cdot 10^{-3} \ м.$$

Пространственный угол сдвига между осями главной обмотки полюса и короткозамкнутого витка по (7.10):

$$\beta = \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\alpha_{i\,k}}{2} = \frac{135}{2} - \frac{33,75}{2} = 50,63 \ эл.\ град.$$

Расчетное активное сопротивление $2p$ последовательно соединенных короткозамкнутых витков, приведенное к числу витков главной обмотки статора, по (7.11):

$$r_з^{`} = (2 - 12)\ 2p\ r_1 = 6 \cdot 2 \cdot 57,17 = 686,02 \ Ом.$$

Обмоточный коэффициент короткозамкнутого витка по (7.12):

$$k_{w\,з} = \sin\left(\frac{\alpha_{i\,k}\ \pi}{\alpha_i\ 2}\right) = \sin\left(\frac{33,75 \cdot \pi}{135 \cdot 2}\right) = 0,383.$$

Действительное активное сопротивление одного короткозамкнутого витка по (7.13):

$$r_з = \frac{r_з^{`}}{2p} \cdot \frac{k_{w\,з}^2}{W_1^2} = \frac{686,02}{2} \cdot \frac{0,383^2}{596^2} = 1,414 \cdot 10^{-4} \ Ом.$$

Ширина короткозамкнутого витка по (7.14):

$$a_з = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\right) \cdot b_{пл}^` = \frac{1}{2} \cdot 5{,}95 \cdot 10^{-3} = 2{,}98 \cdot 10^{-3} \ м.$$

Принимаем $a_з = 3 \cdot 10^{-3}$ $м$.

Средняя длина короткозамкнутого витка по (7.15):

$$l_{ср\ з} = 2l_o + 2\left(b_{пл}^` + a_з\right) = 2 \cdot 0{,}038 + 2 \cdot \left(5{,}95 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3}\right) = 0{,}094 \ м.$$

Поперечное сечение короткозамкнутого витка по (7.16):

$$q_{a\ з} = k_{\theta\ в} \frac{l_{ср\ з}}{\gamma_в\ r_з} = 1{,}22 \cdot \frac{0{,}094}{57 \cdot 10^6 \cdot 1{,}41 \cdot 10^{-4}} = 1{,}43 \cdot 10^{-5} \ м^2,$$

где $\gamma_в = 57 \cdot 10^6 \ \frac{м}{Ом \cdot м^2}$ – удельная электрическая проводимость материала короткозамкнутого витка

$k_{\theta\ в} = k_\theta = 1{,}22$ – так как короткозамкнутые витки и главная обмотка выполняются из медного провода.

Высота короткозамкнутого витка по (7.17):

$$b_з = \frac{q_{a\ з}}{a_з} = \frac{1{,}43 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-3}} = 4{,}72 \cdot 10^{-3} \ м.$$

Принимаем $b_з = 4{,}7 \cdot 10^{-3}$ $м$.

Уточняем поперечное сечение короткозамкнутого витка по (7.18):

$$q_{a\ з} = a_з b_з = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 4{,}7 \cdot 10^{-3} = 1{,}41 \cdot 10^{-6} \ м^2.$$

Уточняем активное сопротивление короткозамкнутого витка по (7.19):

$$r_з = k_{\theta\ в} \frac{l_{ср\ з}}{\gamma_в\ q_{а\ з}} = 1{,}22 \cdot \frac{0{,}094}{57 \cdot 10^6 \cdot 1{,}41 \cdot 10^{-6}} = 1{,}425 \cdot 10^{-4}\ Ом.$$

Расчетное активное сопротивление $2p$ последовательно соединенных короткозамкнутых витков, приведенное к числу витков главной обмотки статора, по (7.20):

$$r'_з = \frac{r_з 2p\ W_1^2}{k_{w\ з}^2} = \frac{1{,}425 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot\ 596^2}{0{,}383^2} = 691{,}53\ Ом.$$

Ширина выреза на полюсе по (7.21):

$$a_{п\ з} = a_з + 1 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-3}\ м.$$

Высота выреза на полюсе по (7.22):

$$h_{п\ з} = b_з + 1 \cdot 10^{-3} = 4{,}7 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} = 5{,}7 \cdot 10^{-3}\ м.$$

Поперечный разрез рассчитываемого двигателя показан на рисунке 11.2.

Удельная магнитная проводимость для потока рассеяния в пазу полюса статора по (7.23):

$$\lambda_{п\ з} = 0{,}4\pi \frac{h_{п\ з}}{3\, a_{п\ з}} \cdot 10^{-6} = 0{,}4 \cdot \pi \cdot \frac{5{,}7 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-6} = 5{,}97 \cdot 10^{-7}\ Гн/м.$$

стр. 70 отсутствует

Индуктивное сопротивление одного короткозамкнутого витка по (7.26):

$$x_з = 2\pi\, f_1\, \lambda_з\, l_o = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1{,}04 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}038 = 1{,}24 \cdot 10^{-5}\ Ом.$$

Полное сопротивление одного короткозамкнутого витка по (7.27):

$$\underline{Z}_з = r_з + j \cdot x_з = 1{,}43 \cdot 10^{-4} + j \cdot 1{,}24 \cdot 10^{-5}\ Ом.$$

Расчетное индуктивное сопротивление $2p$ последовательно соединенных короткозамкнутых витков, приведенное к числу витков главной обмотки статора, по (7.28):

$$x'_з = 2p\, x_з \frac{W_1^2}{k_{w\,з}^2} = 2 \cdot 1{,}24 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{596^2}{0{,}383^2} = 60{,}21\ Ом.$$

Расчетное полное сопротивление $2p$ последовательно соединенных короткозамкнутых витков, приведенное к числу витков главной обмотки статора, по (7.29):

$$\underline{Z}'_з = r'_з + j \cdot x'_з = 691{,}53 + j \cdot 60{,}21\ Ом.$$

Приведенное к числу витков главной обмотки статора индуктивное сопротивление взаимоиндукции между этой обмоткой и короткозамкнутым витком по (7.30):

$$x_m = \frac{\alpha_{i\,k}}{\alpha_i} \cdot \frac{x_o}{p} = \frac{33{,}75}{135} \cdot \frac{859{,}73}{1} = 214{,}93\ Ом.$$

Активное сопротивление стержня ротора по (7.31):

$$r_{cm} = k_{\theta\, p} \frac{l_o}{\gamma_p \; q_{cm}} = 1{,}22 \cdot \frac{0{,}038}{26 \cdot 10^6 \cdot 1{,}76 \cdot 10^{-6}} = 1{,}01 \cdot 10^{-3} \;\; Ом.$$

где $\gamma_p = 26 \cdot 10^6 \; \dfrac{м}{Ом \cdot м^2}$ удельная электрическая проводимость материала короткозамкнутой обмотки ротора.

Коэффициент увеличения сопротивления обмотки ротора при нагревании их от 20 до $75\ ^oC$ по (7.3):

$$k_{\theta\, p} = 1 + \alpha_t (\vartheta - 20) = 1 + 0{,}004 \cdot (75 - 20) = 1{,}22 \,,$$

где $\alpha_t = 0{,}004 -$температурный коэффициент для алюминия.

Активное сопротивление сегмента короткозамыкающего кольца между двумя стержнями по (7.32):

$$r_k = k_{\theta\, p} \frac{\pi \; D_k}{\gamma_p \; z_2 \; q_k} = 1{,}22 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}036}{26 \cdot 10^6 \cdot 14 \cdot 3{,}42 \cdot 10^{-6}} = 1{,}1 \cdot 10^{-4} \;\; Ом.$$

Активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора по (7.33):

$$r_2 = r_{cm} + \frac{r_k}{2 \sin^2 \dfrac{\pi \; p}{z_2}} = 1{,}01 \cdot 10^{-3} + \frac{1{,}1 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot \sin^2 \dfrac{\pi}{14}} = 2{,}12 \cdot 10^{-3} \;\; Ом.$$

Приведенное активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора по (7.34):

$$r_2^{`} = \frac{4m_1(k_{w1}W_1)^2}{z_2} r_2 = \frac{4 \cdot 1 \cdot (1 \cdot 596)^2}{14} 2{,}12 \cdot 10^{-3} = 215{,}34 \ Ом.$$

Удельная магнитная проводимость пазового рассеяния обмотки ротора по (7.35):

$$\lambda_{n2} = 0{,}785 - \frac{b_{ш2}}{2d_{n2}} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} = 0{,}785 - \frac{1}{2 \cdot 1{,}5} + \frac{0{,}5}{1} = 0{,}952 \ Гн/м:$$

Удельная магнитная проводимость лобового рассеяния обмотки ротора по (7.36):

$$\lambda_{л2} = \frac{2{,}3 D_{кл}}{4 \, z_2 \, l_o \sin\left(\frac{\pi \ p}{z_2}\right)^2} \log\left(\frac{4{,}7 D_{кл}}{2a_{кл} \cdot 10^{-3} + b_{кл} \cdot 10^{-3}}\right) =$$

$$= \frac{2{,}3 \cdot 0{,}036}{4 \cdot 14 \cdot 0{,}038 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{14}\right)^2} \log\left(\frac{4{,}7 \cdot 0{,}038}{2 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-3} + 1{,}9 \cdot 10^{-3}}\right) = 1{,}157 \ Гн/м.$$

Коэффициент удельной магнитной проводимости дифференциального рассеяния по (7.37):

$$\xi = 1 + \frac{1}{5}\left(\frac{\pi \ p}{z_2}\right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{z_2}\right)^2} = 1 + \frac{1}{5}\left(\frac{\pi}{14}\right)^2 - \frac{0{,}025}{1 - \left(\frac{1}{14}\right)^2} = 0{,}985$$

где $\Delta_z = 0{,}025$ – по кривым рисунка 7.2.

$$\lambda_{\partial 2} = \frac{t_2}{12\,\delta\,k_\delta}\xi = \frac{8{,}44\cdot 10^{-3}}{12\cdot 0{,}2\cdot 10^{-3}\cdot 1{,}106}\cdot 0{,}985 = 3{,}131\ \textit{Гн/м}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния короткозамкнутой обмотки ротора по (7.38):

$$x_2 = 7{,}9\,f_1\,l_o\left(\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\partial 2}\right)\cdot 10^{-6} =$$

$$= 2\cdot\pi\cdot 50\cdot 0{,}038\cdot\left(0{,}952 + 1{,}157 + 3{,}131\right)\cdot 10^{-6} = 6{,}26\cdot 10^{-5}\ \textit{Ом}.$$

Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния короткозамкнутой обмотки ротора по (7.39):

$$x_2' = \frac{4m_1\left(k_{w1}W_1\right)^2}{z_2}x_2 = \frac{4\cdot 1\cdot\left(1\cdot 596\right)^2}{14}\cdot 6{,}26\cdot 10^{-5} = 6{,}35\ \textit{Ом}.$$

11.8 Потери мощности в режиме холостого хода двигателя

Масса полюсов статора по (8.3):

$$G_{пл} = 2p\ \gamma_{ст}\ h_{пл}\ b_{пл}\ l_{пл}\ k_c = 2\cdot 7800\cdot 0{,}015\cdot 0{,}026\cdot 0{,}038\cdot 0{,}97 = 0{,}231\ \textit{кг}.$$

Потери в полюсах статора по (8.2):

$$P_{c\ пл} = \beta_c B_{пл}^2\left(\frac{f_1}{50}\right)^{1{,}3} G_{пл} = 2{,}8\cdot 0{,}9^2\cdot\left(\frac{50}{50}\right)^{1{,}3}\cdot 0{,}231 = 0{,}525\ \textit{Вт},$$

где $\beta_c = 2,8 \ \frac{Вт}{кг}$ – удельные потери в стали.

Масса сердечника статора по (8.5):

$$G_c = \pi \, \gamma_{ст} \left(D_н - h_c\right) h_c \, l_o \, k_c =$$
$$= 3{,}14 \cdot 7800 \cdot \left(0{,}092 - 0{,}012\right) \cdot 0{,}012 \cdot 0{,}038 \cdot 0{,}97 = 0{,}864 \ кг.$$

Потери в сердечнике статора по (8.4):

$$P_{c\ c} = \beta_c B_c^2 \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} G_c = 2{,}8 \cdot 1^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 0{,}864 = 2{,}418 \ кг.$$

Магнитные потери в стали состоят из потерь в полюсах и сердечнике статора по (8.1):

$$P_{ст} = P_{c\ пл} + P_{c\ c} = 0{,}525 + 2{,}418 = 2{,}943 \ Вт.$$

Электрические потери в главной обмотке статора от намагничивающей составляющей полного тока по (8.6):

$$P_{м10} = I_{or}^2 \, r_1 = 0{,}088^2 \cdot 57{,}17 = 0{,}44 \ Вт.$$

ЭДС короткозамкнутого витка по (8.7):

$$E_{кз} = 4{,}44 \frac{\alpha_{ik}}{\alpha_i} \varPhi \, f_1 = 4{,}44 \cdot \frac{33{,}75}{135} \cdot 7{,}315 \cdot 10^{-4} \cdot 50 = 0{,}041 \ B.$$

Ток короткозамкнутого витка по (8.8):

$$I_{кз} = \frac{E_{кз}}{|\underline{Z}_з|} = \frac{0,041}{\left|1,425 \cdot 10^{-4} + j \cdot 1,24 \cdot 10^{-5}\right|} = 283,73\ A.$$

Электрические потери в короткозамкнутых витках статора по (8.9):

$$P_{кз} = 2p\ I_{кз}^2\ r_з = 2 \cdot 283,73^2 \cdot 1,425 \cdot 10^{-4} = 22,95\ Вт.$$

Потери на трение в подшипниках по (8.11):

$$P_{тр\ п} = k_т G_р n_2 \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot 0,329 \cdot 3000 \cdot 10^{-3} = 2,468\ Вт,$$

где $k_т = 2,5$ – коэффициент трения в подшипниках;

$n_2 = n_1 = 3000\ \frac{об}{мин}$.

Масса ротора с беличьей клеткой по (8.12):

$$G_р = \gamma'_р \frac{\pi}{4} D_р^2\ l_о = 7800 \cdot \frac{3,14}{4} 0,0376^2 \cdot 0,038 = 0,329\ Вт.$$

Потери на трение о воздух по (8.13):

$$P_{тр\ в} = 2D_р^3\ n_2^3\ l_о \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 0,0376^3 \cdot 3000^3 \cdot 0,038 \cdot 10^{-6} = 0,109\ Вт.$$

Полные механические потери по (8.10):

$$P_{мх} = P_{тр\ п} + P_{тр\ в} = 2,468 + 0,109 = 2,577\ Вт.$$

Предварительное значение суммарных потерь в двигателе в режиме холостого хода по (8.14):

$$P_{\Sigma} = P_{ст} + P_{кз} + P_{м10} + P_{мх} = 2,943 + 22,95 + 0,44 + 2,577 = 28,914 \ Вт.$$

Активная составляющая тока холостого хода двигателя по (8.15):

$$I_{oa} = \frac{P_{\Sigma}}{U_1} = \frac{28,914}{220} = 0,131 \ A.$$

Ток холостого хода двигателя по (8.16):

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{or}^2} = \sqrt{0,131^2 + 0,088^2} = 0,158 \ A.$$

Активное сопротивление намагничивающего контура, эквивалентное магнитным потерям в стали статора по (8.17):

$$r_o = \frac{P_{ст}}{2\, I_o^2} = \frac{2,943}{2 \cdot 0,158^2} = 58,86 \ Ом.$$

Коэффициент мощности в режиме холостого хода по (8.18):

$$cos\,\phi_o = \frac{I_{oa}}{I_o} = \frac{0,131}{0,158} = 0,831$$

11.9 Вращающий момент однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами

Рассчитываем точки характеристик, соответствующие скольжениям: $s=1$; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0,1; 0,08; 0,06; 0,04; 0,02. Подробный расчет приведен для скольжения $s=1$. Данные расчета других точек сведены в таблицу 11.1. Пусковые характеристики представлены на рисунке 11.3

Активное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для прямого поля по (9.5), *Ом*:

$$R_f = \frac{\frac{r_2'}{s}\left(r_o^2 + x_o^2\right) + r_o\left(\frac{r_2'^2}{s^2} + x_2'^2\right)}{\left(\frac{r_2'}{s} + r_o\right)^2 + \left(x_2' + x_o\right)^2} =$$

$$= \frac{\frac{215,34}{1}\cdot\left(58,86^2 + 859,73^2\right) + 58,86\cdot\left(\frac{215,34^2}{1^2} + 6,35^2\right)}{\left(\frac{215,34}{1} + 58,86\right)^2 + \left(6,35 + 859,73\right)^2} = 197,08\ \ Ом.$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для прямого поля по (9.7):

$$X_f = \frac{x_2'\left(r_o^2 + x_o^2\right) + x_o\left(\frac{r_2'^2}{s^2} + x_2'^2\right)}{\left(\frac{r_2'}{s} + r_o\right)^2 + \left(x_2' + x_o\right)^2} =$$

$$= \frac{6,35\cdot\left(58,86^2 + 859,73^2\right) + 859,73\cdot\left(\frac{215,34^2}{1^2} + 6,35^2\right)}{\left(\frac{215,34}{1} + 58,86\right)^2 + \left(6,35 + 859,73\right)^2} = 54,06\ \ Ом.$$

Активное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для обратного поля по (9.6):

$$R_b = \frac{\frac{r_2'}{2-s}\left(r_o^2 + x_o^2\right) + r_o\left(\frac{r_2'^2}{(2-s)^2} + x_2'^2\right)}{\left(\frac{r_2'}{2-s} + r_o\right)^2 + \left(x_2' + x_o\right)^2} =$$

$$= \frac{\frac{215,34}{2-1}\cdot\left(58,86^2 + 859,73^2\right) + 58,86\cdot\left(\frac{215,34^2}{(2-1)^2} + 6,35^2\right)}{\left(\frac{215,34}{2-1} + 58,86\right)^2 + \left(6,35 + 859,73\right)^2} = 197,08 \ \text{Ом}.$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для обратного поля по (9.8):

$$X_b = \frac{x_2'\left(r_o^2 + x_o^2\right) + x_o\left(\frac{r_2'^2}{(2-s)^2} + x_2'^2\right)}{\left(\frac{r_2'}{2-s} + r_o\right)^2 + \left(x_2' + x_o\right)^2} =$$

$$= \frac{6,35\cdot\left(58,86^2 + 859,73^2\right) + 859,73\cdot\left(\frac{215,34^2}{(2-1)^2} + 6,35^2\right)}{\left(\frac{215,34}{2-1} + 58,86\right)^2 + \left(6,35 + 859,73\right)^2} = 54,06 \ \text{Ом}.$$

Полное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для прямого поля по (9.9):

$$\underline{Z}_f = R_f + jX_f = 197,08 + j\cdot 54,06 \ \text{Ом}.$$

Полное сопротивление намагничивающего контура и короткозамкнутой обмотки ротора для обратного поля по (9.10):

$$\underline{Z}_b = R_b + jX_b = 197{,}08 + j \cdot 54{,}06 \ Ом.$$

Сопротивление взаимной индукции между главной обмоткой и короткозамкнутым витком по (9.11):

$$\underline{Z}_m = jx_m = j \cdot 214{,}93 \ Ом.$$

Коэффициент $\underline{Q}$ схемы замещения по (9.4):

$$\underline{Q} = \left(\underline{Z}_f + \underline{Z}_b\right)\left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}'_з - 2\underline{Z}_m \cos\beta\right) + 4\underline{Z}_f \underline{Z}_b \sin^2\beta + \underline{Z}_1\underline{Z}'_з - \underline{Z}_m^2 =$$

$$= \left(197{,}08 + j \cdot 54{,}06 + 176{,}08 + j \cdot 54{,}06\right) \times$$

$$\times\left(57{,}17 + j \cdot 275{,}11 + 691{,}53 + j \cdot 60{,}13 - 2 \cdot j \cdot 214{,}93 \cdot \cos(50{,}63^o)\right) +$$

$$+4 \cdot (197{,}08 + j \cdot 54{,}06) \cdot (197{,}08 + j \cdot 54{,}06) \cdot \sin^2(50{,}63^o) +$$

$$+(57{,}17 + j \cdot 275{,}11) \cdot (691{,}53 + j \cdot 60{,}13) - (j \cdot 214{,}93)^2 = 4{,}43 \cdot 10^5 + j \cdot 3{,}5 \cdot 10^5$$

Ток главной обмотки статора по (9.2):

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1\left(\underline{Z}'_з + \underline{Z}_f + \underline{Z}_b\right)}{\underline{Q}} =$$

$$= \frac{220 \cdot \left(691{,}53 + j \cdot 60{,}13 + 197{,}08 + j \cdot 54{,}06 + 197{,}08 + j \cdot 54{,}06\right)}{4{,}43 \cdot 10^5 + j \cdot 3{,}5 \cdot 10^5} =$$

$$= 0{,}372 - j \cdot 0{,}211 \ A.$$

Ток короткозамкнутого витка по (9.3):

$$\dot{I}'_з = -\frac{\dot{U}_1\left[\underline{Z}_m + \left(\underline{Z}_f + \underline{Z}_b\right)cos\,\beta + j\left(\underline{Z}_f - \underline{Z}_b\right)sin\,\beta\right]}{\underline{Q}} =$$

$$= -\frac{220\cdot\left[j\cdot 214{,}93 + \left(197{,}08 + j\cdot 54{,}06 + 197{,}08 + j\cdot 54{,}06\right)cos(50{,}63^o)\right]}{4{,}43\cdot 10^5 + j\cdot 3{,}5\cdot 10^5} +$$

$$+\left[-\frac{220\cdot\left[\left(197{,}08 + j\cdot 54{,}06 - (197{,}08 + j\cdot 54{,}06)\right)sin\left(50{,}63^o\right)\right]}{4{,}43\cdot 10^5 + j\cdot 3{,}5\cdot 10^5}\right] =$$

$$-0{,}145 - j\cdot 0{,}026\ A.$$

Синхронная угловая скорость вращения поля:

$$\omega_1 = {}^{2\,\pi\,f_1}\!/_{p} = {}^{2\cdot 3{,}14\cdot 50}\!/_{1} = 314{,}16\ {}^{об}\!/_{мин}.$$

Определяем углы сдвигов токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}'_з$ относительно первичного напряжения $\dot{U}_1$:

$$\dot{I}_1 = 0{,}372 - j\cdot 0{,}211 = 0{,}428\cdot e^{-j\cdot 0{,}515}\ A.$$

$$\phi_1 = -0{,}515\ рад.,\ \phi_1 = -29{,}5^o.$$

$$\dot{I}'_з = -0{,}145 - j\cdot 0{,}026 = 0{,}147\cdot e^{-j\cdot 2{,}96}\ A.$$

$$\varphi_з = -2{,}96\ рад.,\ \phi_з = -169{,}72^o.$$

Вращающий момент двигателя в следующем виде по (9.1):

$$M=\frac{1}{\omega_1}\left(\begin{gathered}\left[\dot{I}_1^2+\dot{I}_з'^2-2\dot{I}_1\ \dot{I}_з'\ \cos(\varphi_1-\varphi_з)\cos\beta\right]\left(R_f-R_b\right)+\\+2\dot{I}_1\ \dot{I}_з'\ \left(R_f+R_b\right)\sin(\varphi_1-\varphi_з)\sin\beta\end{gathered}\right)=$$

$$=\frac{1}{314{,}16}\cdot\left(\begin{gathered}\left[\begin{gathered}(0{,}372-j\cdot 0{,}211)^2+(-0{,}145-j\cdot 0{,}026)^2\\-2\cdot(0{,}372-j\cdot 0{,}211)\cdot(-0{,}145-j\cdot 0{,}026)\times\\\times cos(180^o-29{,}5^o-169{,}72^o)\cdot cos(50{,}63^o)\end{gathered}\right]\cdot(197{,}08-197{,}08)+\\+2\cdot(0{,}372-j\cdot 0{,}211)\cdot(-0{,}145-j\cdot 0{,}026)\cdot(197{,}08+197{,}08)\times\\\times sin(180^o-29{,}5^o-169{,}72^o)\cdot sin(50{,}63^o)\end{gathered}\right)=$$

$$=0{,}038-j\cdot 0{,}013\,Н\cdot м.$$

$$|M|=0{,}04\ \ Н\cdot м.$$

Номинальный момент нагрузки по (9.12):

$$M_{нагр}=9{,}55\cdot\frac{P_2}{0{,}9\cdot n_1}=9{,}55\cdot\frac{10}{0{,}9\cdot 3000}=0{,}035\,Н\cdot м.$$

Таблица 11.1 – Данные расчета пусковых характеристик

№	Расчетная формула	Ед. измер.	Скольжение									
			1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,08	0,06	0,04	0,02
1	R_f	*Ом*	197,08	238,03	296,45	376,64	425,48	331,68	291,65	243,54	187,81	125,64
2	X_f	*Ом*	54,06	78,17	124,91	229,43	490,99	707,18	749,64	788,14	820,62	845,04
3	R_b	*Ом*	197,08	167,51	145,37	128,27	114,69	108,91	107,82	106,76	105,71	104,68
4	X_b	*Ом*	54,06	40,2	31,55	25,81	21,81	20,25	19,97	19,7	19,43	19,17
5	$\underline{Z}_f$	*Ом*	$197{,}08+j\cdot 54{,}06$	$238{,}03+j\cdot 78{,}17$	$296{,}45+j\cdot 124{,}91$	$376{,}64+j\cdot 229{,}43$	$425{,}48+j\cdot 490{,}99$	$331{,}68+j\cdot 707{,}18$	$291{,}65+j\cdot 749{,}64$	$243{,}54+j\cdot 788{,}14$	$187{,}81+j\cdot 820{,}62$	$125{,}64+j\cdot 845{,}04$
6	$\underline{Z}_b$	*Ом*	$197{,}08+j\cdot 54{,}06$	$167{,}51+j\cdot 40{,}2$	$145{,}37+j\cdot 31{,}55$	$128{,}27+j\cdot 25{,}81$	$114{,}69+j\cdot 21{,}81$	$108{,}91+j\cdot 20{,}25$	$107{,}82+j\cdot 19{,}97$	$106{,}76+j\cdot 19{,}7$	$105{,}71+j\cdot 19{,}43$	$104{,}68+j\cdot 19{,}17$
7	$\underline{Z}_m$	*Ом*	$j\cdot 214{,}93$	$j\cdot 214{,}93$	$j\cdot 214{,}93$	$j\cdot 214{,}93$	$j\cdot 214{,}93$	$j\cdot 214{,}93$	$j\cdot 214{,}93$	$j\cdot 214{,}93$	$j\cdot 214{,}93$	$j\cdot 214{,}93$
8	$\underline{Q}\cdot 10^5$	-	$4{,}43+j\cdot 3{,}5$	$4{,}53+j\cdot 3{,}62$	$4{,}84+j\cdot 4{,}04$	$5{,}33+j\cdot 5{,}1$	$5{,}33+j\cdot 7{,}68$	$4{,}06+j\cdot 9{,}66$	$3{,}6+j\cdot 1{,}0$	$3{,}06+j\cdot 1{,}03$	$2{,}46+j\cdot 1{,}06$	$1{,}8+j\cdot 1{,}07$
9	$\dot{I}_1$	*А*	$0{,}372-j\cdot 0{,}211$	$0{,}367-j\cdot 0{,}207$	$0{,}352-j\cdot 0{,}196$	$0{,}323-j\cdot 0{,}179$	$0{,}276-j\cdot 0{,}161$	$0{,}245-j\cdot 0{,}155$	$0{,}238-j\cdot 0{,}154$	$0{,}23-j\cdot 0{,}154$	$0{,}223-j\cdot 0{,}153$	$0{,}215-j\cdot 0{,}153$

Продолжение таблицы 11.1

№	Расчетная формула	Ед. измер.	Скольжение									
			1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,08	0,06	0,04	0,02
10	$\lvert\dot{I}_1\rvert$	A	0,428	0,422	0,403	0,369	0,32	0,29	0,283	0,277	0,271	0,264
11	$\dot{I}'_з$	A	-0,145-$j\cdot$0,026	-0,149-$j\cdot$0,048	-0,152-$j\cdot$0,069	-0,152-$j\cdot$0,089	-0,148-$j\cdot$0,109	-0,144-$j\cdot$0,118	-0,143-$j\cdot$0,119	-0,142-$j\cdot$0,121	-0,14-$j\cdot$0,123	-0,139-$j\cdot$0,124
12	$\lvert\dot{I}'_з\rvert$	A	0,147	0,157	0,167	0,177	0,184	0,186	0,186	0,186	0,186	0,187
13	φ_1	град.	-29,5	-29,36	-29,06	-28,99	-30,32	-32,4	-33,01	-33,7	-34,49	-35,38
14	$\varphi_з$	град.	-169,72	-162,09	-155,66	-149,74	-143,8	-140,71	-140,08	-139,45	-138,82	-138,18
15	$M\cdot 10^{-2}$	$Н\cdot м$	0,038-$j\cdot$0,013	0,069-$j\cdot$0,04	0,103-$j\cdot$0,06i	0,131-$j\cdot$0,069	0,117-$j\cdot$0,05	0,064-$j\cdot$0,026	0,049-$j\cdot$0,02	0,033-$j\cdot$0,014	0,016-$j\cdot$0,008	-0,0003-$j\cdot$0,002
16	$\lvert M\rvert$	$Н\cdot м$	0,04	0,08	0,119	0,148	0,127	0,069	0,053	0,036	0,018	0,002

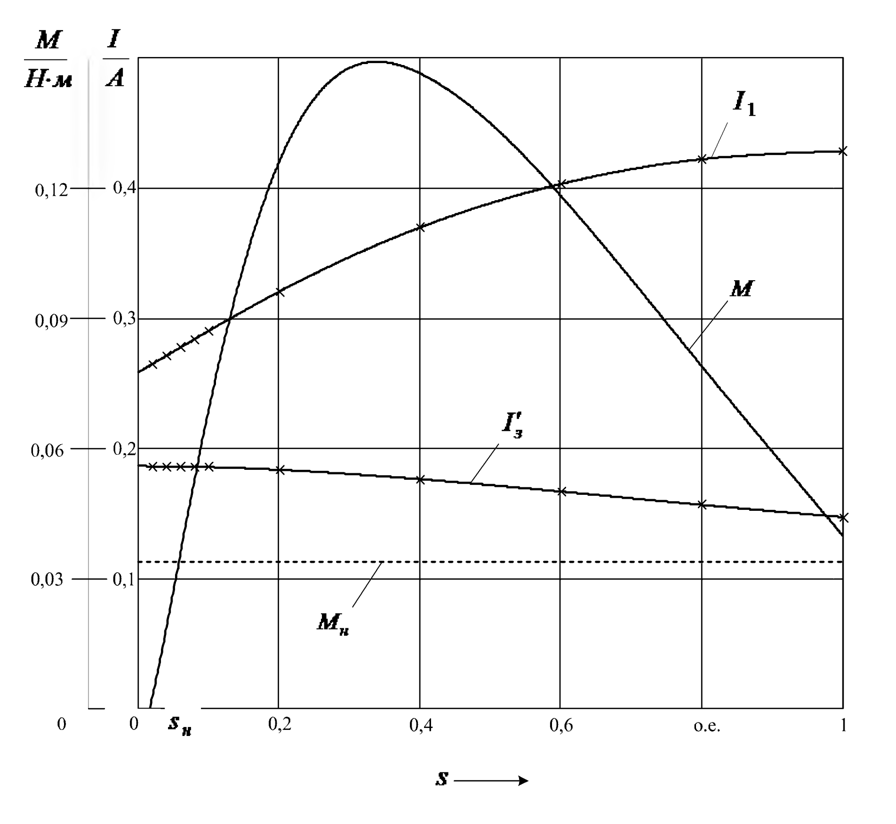


Рисунок 11.3 – Пусковые характеристики спроектированного двигателя

По построенным пусковым характеристика определяем номинальные данные двигателя: $s_н = 0{,}059$; $I_{1н} = 0{,}277\ A$, $I'_{зн} = 0{,}186\ A$.

Номинальный ток обмотки ротора по (5.8):

$$I_{2н} = k\frac{2m_1 k_{w1} W_1}{z_2} I_{1н} = 0{,}5 \cdot \frac{2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 596}{14} \cdot 0{,}277 = 11{,}8\ A,$$

11.10 Потери и коэффициент полезного действия

Электрические потери в главной обмотке статора по (10.1):

$$P_{м1} = I_{1н}^2 \cdot r_1 = 0,277^2 \cdot 57,17 = 4,38\ Вт.$$

Электрические потери в короткозамкнутых витках статора по (10.2):

$$P_{мз} = \left(I'_{зн}\right)^2 \cdot r'_з = 0,186^2 \cdot 691,53 = 24\ Вт.$$

Электрические потери в короткозамкнутой обмотке ротора по (10.3):

$$P_{м2} = k^2 \cdot I_{1н}^2 \cdot r'_2 = 0,5^2 \cdot 0,277^2 \cdot 215,34 = 4,13\ Вт.$$

Суммарные потери в двигателе при номинальной нагрузке по (10.4):

$$P_{\Sigma} = \zeta_o\left(P_{м1} + P_{мз} + P_{м2} + P_{ст} + P_{мх}\right) =$$
$$= 1,06 \cdot \left(4,38 + 24 + 4,13 + 2,94 + 2,58\right) = 40,31\ Вт.$$

где $\zeta_o = 1,06$.

Коэффициент полезного действия по (10.5):

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\Sigma}} \cdot 100 = \frac{10}{10 + 40,31} \cdot 100 = 19,88\ \%.$$

Для определения номинального коэффициента мощности построим зависимость $\varphi_1 = f(s)$ (рисунок 11.4).

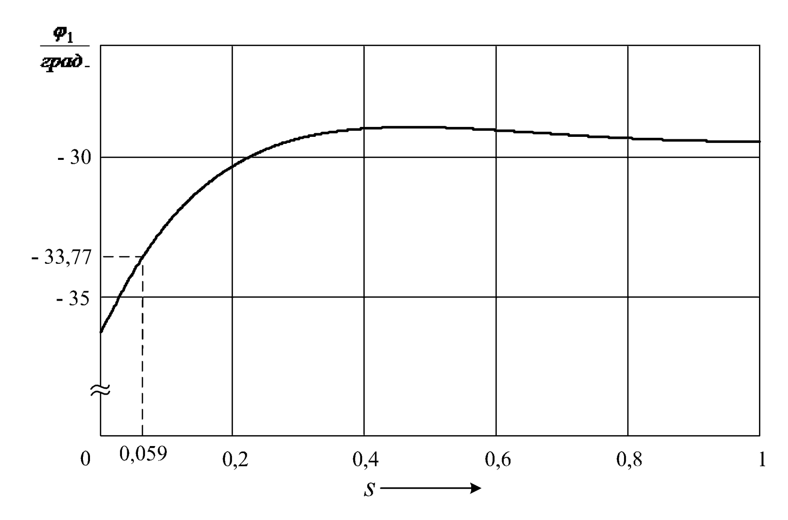


Рисунок 11.4 – К определению номинального коэффициента мощности

Номинальный коэффициент мощности:

$$\cos(\varphi_{1н}) = \cos(-33,77^{o}) = 0,83\,.$$

Список использованных источников

1 Электрические машины: учебник для бакалавров / под ред. И. П. Копылова.- М. : Юрайт, 2015. - 675 с.

2 Вольдек, А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. - СПб. : Питер, 2008. - 350 с.

3 Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / под ред. И.П. Копылова.- 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 2005. - 767 с.

4 Осин, И.Л. Электрические машины автоматических устройств: учеб. пособие для вузов / И.Л. Осин, Ф.М. Юферов. - М. : МЭИ, 2003. - 424 с.

5 Ермолин, Н.П. Электрические машины малой мощности: учеб. пособие для вузов / Н.П. Ермолин.- 2-е изд., испр. и доп. - М. : Высш. шк., 1967. - 504 с.

Приложение А
(справочное)

Обмоточный провод круглого поперечного сечения

Таблица А.1 - Диаметры и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2
0,08	0,1	0,00502	(0,53)	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,1	0,122	0,00785	0,6	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	(0,67)	0,73	0,358
(0,132)	0,154	0,01368	0,71	0,77	0,396
0,14	0,162	0,01539	0,75	0,815	0,442
0,15	0,18	0,01767	0,8	0,865	0,503
0,16	0,19	0,0201	0,85	0,915	0,567
0,17	0,2	0,0227	0,9	0,965	0,636
0,18	0,21	0,0255	0,95	1,015	0,706
(0,19)	0,22	0,0284	1,0	1,08	0,785
0,2	0,23	0,0314	1,06	1,14	0,883
(0,212)	0,242	0,0353	1,12	1,20	0,985
0,224	0,259	0,0394	1,18	1,26	1,094
(0,236)	0,271	0,0437	1,25	1,33	1,227
0,25	0,285	0,0491	1,32	1,405	1,368
(0,265)	0,3	0,0552	1,40	1,485	1,539
0,28	0,315	0,0616	1,50	1,585	1,767
(0,3)	0,335	0,0707	1,60	1,685	2,011
0,315	0,35	0,0779	1,70	1,785	2,27
0,335	0,37	0,0881	1,80	1,895	2,54
0,355	0,395	0,099	1,90	1,995	2,83
0,375	0,415	0,1104	2,00	2,095	3,14

Продолжение таблицы А.1

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, $мм^2$	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, $мм^2$
0,4	0,44	0,1257	2,12	2,220	3,53
0,425	0,565	0,1419	2,24	2,34	3,94
0,45	0,49	0,159	2,36	2,46	4,36
(0,475)	0,515	0,1772	2,5	2,6	4,91
0,5	0,545	0,1963			

Приложение Б
(справочное)

Кривые намагничивания для зубцов и ярма асинхронных двигателей

Таблица Б.1 - Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей (сталь 2013)

B, Тл	0,0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020

При магнитной индукции $B<0{,}4$ *Тл* кривая намагничивания выражается уравнением $H=310\cdot B$.

Таблица Б.2 - Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей (сталь 2013)

B, Тл	0,0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181

Продолжение таблицы Б.2

B, Тл	0,0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900

Таблица Б.3 - Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей (стали 2212 и 2312)

B, Тл	0,0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1,0	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1000	1020	1040	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1750,	1790	1840
1,7	1900	1940	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2700	2810	2930	3060	3190	3320	3550	3690	3840	4000
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420

При магнитной индукции $B<0,4$ *Тл* кривая намагничивания выражается уравнением $H=350 \cdot B$.

Таблица Б.4 - Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей (стали 2212 и 2312)

B, Тл	0,0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1,0	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4301	4490	4670	4850	5040

Приложение В
(справочное)

Основные технические требования к приводу бытовых приборов с вентиляторной нагрузкой

Таблица В.1 – Технические требования к электродвигателям

Группа приборов	Номинальная мощность, *Вт*	Число полюсов	Режим работы (по ГОСТ 183-74)	Условия охлаждения двигателя	M_n^*, *о.е.*	Характерные требования
Настольно-настенные вентиляторы (в том числе с автоматическим поворотом)	6; 10; 16	4	S1	Крыльчаткой прибора	0,4 - 0,6	Несколько частот вращения, либо возможность плавного регулирования частоты вращения
	4; 6	2	S1		0,3	
Оконные, кухонные вентиляторы	4; 6; 10	2; 4	S1	То же	0,3	Несколько частот вращения
Тепловентиляторы	4; 6	2	S1	—	0,3	То же
Насосы стиральных машин	16	2	S3	Собственным вентилятором	0,6	ПВ = 40 %, время цикла 7 мин
Диапроекторы	2,5; 4; 6	2	S1	Крыльчаткой прибора	0,3 - 1,0	Ограниченная осевая длина двигателя
Рукосушители	10	2	S1	—	0,3	—
Воздухоочистители	10; 16	2; 4	S1	Крыльчаткой прибора	0,3	Несколько частот вращения

Продолжение таблицы В.1 – Технические требования к электродвигателям

Группа приборов	Номинальная мощность, *Вт*	Число полюсов	Режим работы (по ГОСТ 183-74)	Условия охлаждения двигателя	M_n^*, *о.е.*	Характерные требования
Массажеры	10	2	S1	Собственным вентилятором	0,3	Повышенные циклические радиальные нагрузки, плавное регулирование частоты вращения
Увлажнители воздуха	6	2	S1	То же	0,3	Несколько частот вращения
Ионизаторы	10	2	S1	Крыльчаткой прибора	0,3	—
СВЧ-печи	4; 6	2	S1	То же	0,3	—
Ножеточки	6; 10	2	S2	Без вентилятора	0,4	Время работы до 10 мин
Мороженицы бытовые	2,5	2	S2	Собственным вентилятором	0,3	Должен допускать работу в течение 40 мин в режиме короткого замыкания

Приложение Г
(справочное)

Технические данные асинхронных двигателей с экранированными полюсами

Таблица Г.1 – Технические данные электродвигателей типа ДВ

Тип двигателя	$P_{2н}$, *Вт*	n, *об/мин*	η, *%*	$M_н \cdot 10^{-2}$, *Н · м*	$M_{\max} \cdot 10^{-2}$, *Н · м*	$M^*_{\max}$, *о.е.*	$M^*_п$, *о.е.*	Δt_1, ^oC	Средний уровень звука, *дБ*	Масса, *кг*
1ДВЛВ-1,0-2	1	2200	9	0,16	0,58	1,3	0,37	45	36	0,35
1ДВЛВ-1,6-2	1,6	2100	10	0,34	1,09	1,39	0,44	70	36	0,35
1ДВЛВ-2,5-2	2,5	2200	12	0,55	1,52	1,3	0,47	100	37	0,4
1ДВЛВ-4,0-2	4	2360	15	0,91	2,27	1,3	0,52	105	35	0,46
2ДВЛВ-2,5-2	2,5	2560	13	0,33	1,46	1,45	0,33	100	35	0,49
2ДВЛВ-4-2	4	2520	18	0,49	2,1	1,3	0,3	105	32	0,56
2ДВЛВ-6-2	6	2630	18,5	0,82	3,5	1,5	0,35	-	32	0,67
2ДВЛВ-10-2	10	2700	20	1,14	6,4	1,68	0,3	120	36	0,82
3ДВЛВ-2,5-4	2,5	1220	10	1,33	3,16	1,5	0,63	102	35	0,52
3ДВЛВ-4-4	4	1250	14	1,98	4,9	1,5	0,6	107	24	0,64
3ДВЛВ-6-4	6	1220	16	2,53	6,8	1,35	0,5	121	32	0,75
3ДВЛВ-10-4	10	1260	19	3,92	12,1	1,48	0,48	133	34	1
3ДВЛВ-16-4	16	1290	23,5	5,73	17,85	1,4	0,45	132	36	1,48

где Δt_1 – превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды (указана для двигателей без вентилятора).

Таблица Г.2 – Технические данные электродвигателей типа ДАО

Наименование параметра	Значение параметра для типоисполнения			
	ДАО64-1,6-2,5	ДАО64-2,5-2,5	ДАО64-4,0-2,5	ДАО64-6,0-2,5
U_1, *В*	220	220	220	220
f_1, *Гц*	50	50	50	50
$P_{2н}$, *Вт*	1,6	2,5	4,0	6,0
n, *об/мин*	2500	2500	2500	2500
I_1, *А*, не более	0,12	0,15	0,18	0,25
η, %, не менее	9,5	10	14	15
M_n^*, *о.е.*	0,4	0,4	0,4	0,4
$M_{\max}^*$, *о.е.*	1,4	1,4	1,4	1,4
Масса, *кг*, не более	0,42	0,46	0,52	0,62

Таблица Г.3 – Технические данные электродвигателей Ebmpapst

Тип двигателя	$P_{2н}$, *Вт*	U_1, *В*	*n*, *об/мин*	I_1, *mA*	$M_н \cdot 10^{-2}$, *Н·м*	Масса, *кг*
EM2108	0,6	230	2100	60	0,28	0,2
EM2112	1	230	2200	90	0,46	0,25
EM2118	1,5	230	2300	100	0,7	0,32
EM2124	2	230	2350	120	1	0,4
EM2513-1	1,4	230	2300	135	0,55	0,4
EM2513-2	1,8	230	2500	185	0,7	0,4
EM2518-1	2,7	230	2500	150	1,05	0,5
EM2518-2	3,7	230	2500	260	1,45	0,5
EM2524-1	4	230	2600	200	1,55	0,6
EM2524-2	6,2	230	2500	350	2,4	0,6
EM3015	1,9	230	2600	120	0,7	0,5
EM3020-1	2,8	230	2600	150	1,05	0,7
EM3020-2	5,6	230	2600	380	2,1	0,7

Продолжение таблицы Г.3

Тип двигателя	$P_{2н}$, $Вт$	U_1, $В$	n, $об/мин$	I_1, mA	$M_н \cdot 10^{-2}$, $Н \cdot м$	Масса, $кг$
ЕМ3025-1	4	230	2600	200	1,5	0,8
ЕМ3025-2	7,5	230	2600	440	2,8	0,8
ЕМ3030	8,3	230	2600	460	3,1	0,9
ЕМ3038	11	230	2600	480	3,9	1,2
ЕМ3045	12	230	2600	500	4,3	1,3

Таблица Г.4 – Технические данные электродвигателей YJF

Модель	U_1, $В$	f_1, $Гц$	P_1, $Вт$	$P_{2н}$, $Вт$	I_1, $А$	n, $об/мин$	Размеры, $мм$		
							A	B	H
YJF5-00A	220/240	50/60	30	5	0,20	1300/1550	82,5	17,5	12,5
YJF7-00A	220/240	50/60	38	7	0,28	1300/1550	89,5	17,5	20
YJF10-00A	220/240	50/60	42	10	0,30	1300/1550	89,5	17,5	20
YJF16-00A	220/240	50/60	58	16	0,40	1300/1550	94,5	17,5	25
YJF18-00A	220/240	50/60	60	18	0,42	1300/1550	100,5	17,5	30
YJF25-00A	220/240	50/60	100	25	0,70	1300/1550	110,5	17,5	40
YJF34-00A	220/240	50/60	120	34	0,90	1300/1550	114,5	17,5	45

Рисунок Г.1 – Электродвигатель серии YJF